

控制与决策

Control and Decision

我国航空发动机研制系统协同演化研究

陈俊清, 武博祎, 王奕博, 吕一涵

引用本文:

陈俊清, 武博祎, 王奕博, 等. 我国航空发动机研制系统协同演化研究[J]. *控制与决策*, 2026, 41(1): 234-245.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2025.0643>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

具有执行器故障的四旋翼无人机自适应预定性能控制

Adaptive prescribed performance control of quadrotor with unknown actuator fault
控制与决策. 2021, 36(9): 2103-2112 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0083>

一种基于改进指令整形的四旋翼吊装负载摆动抑制

Load swing suppression of quadrotor slung system based on improved command shaping
控制与决策. 2021, 36(8): 1947-1954 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1733>

结冰飞机的包线保护与控制裕度研究

Envelope protection and control margin of icing aircraft
控制与决策. 2021, 36(6): 1415-1424 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1221>

输出误差约束下四旋翼无人机预定性能反步控制

Prescribed performance backstepping control for quadrotor UAV with output error constraint
控制与决策. 2021, 36(5): 1059-1068 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1249>

基于双种群模糊引力搜索算法的舰载机甲板作业调度

Flight deck operations scheduling based on dual population fuzzy gravitational search algorithm
控制与决策. 2021, 36(11): 2751-2759 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0523>

我国航空发动机研制系统协同演化研究

陈俊清^{1†}, 武博祎^{1,2}, 王奕博², 吕一涵²

(1. 哈尔滨工程大学 经济管理学院, 哈尔滨 150001; 2. 中国国际工程咨询有限公司, 北京 100048)

摘要: 航空发动机研制工作至关重要, 是我国当前的形势所需也是当务之急, 如何提高航空发动机研制效率是我国乃至全世界关注的重点之一. 基于我国航空发动机研制系统的协同演化规律, 借鉴 B-Z (Belousov-Zhabotinskii) 反应模型, 结合协同学相关理论, 构建我国航空发动机研制系统中设计活动、试验活动和制造活动的三维 Logistic 模型, 并对我国航空发动机研制系统协同演化规律进行仿真研究. 仿真结果表明, 我国航空发动机研制系统的发展离不开各子系统间的协同, 而设计制造一体化是我国航空发动机研制效率最高的研制模式, 且政府政策导向对于提高航空发动机研制效率具有重要作用. 所研究的结果能够为政府强化航空产业政策调控、企业调整航空发动机研制策略提供依据, 促进航空发动机研制效率的提升.

关键词: 航空发动机研制; 设计活动; 试验活动; 制造活动; 协同演化; B-Z 反应

中图分类号: C94 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2025.0643

引用格式: 陈俊清, 武博祎, 王奕博, 等. 我国航空发动机研制系统协同演化研究 [J]. 控制与决策, 2026, 41(1): 234-245.

Study on co-evolution of aero-engine development system in China

CHEN Jun-qing^{1†}, WU Bo-yi^{1,2}, WANG Yi-bo², LV Yi-han²

(1. School of Economics and Management, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. China International Engineering Consulting Corporation, Beijing 100048, China)

Abstract: The development of aero-engine is of vital importance, and how to elevate the efficiency of aero-engine R&D has become one of the focuses of the world's concern. In view of China's aero-engine R&D system, this study primarily centers around the Belousov-Zhabotinskii (B-Z) reaction model and combines synergy theory to construct a three-dimensional Logistic model of design activities, test activities and manufacturing activities, and subsequently conducts corresponding simulation research on the co-evolution law of China's aero-engine R&D system. As apparently demonstrated by our research findings, The advancement of China's aero-engine R&D system relies on effective coordination among its various subsystems. Moreover, integration of design and manufacturing is the most efficient development mode for China's aero-engine R&D, and government orientation conducts a critical role in improving the efficiency of aero-engine R&D. In some sense, the research findings are of significant reference value for the government and enterprises to adjust aero-engine R&D strategies and push forward the improvement of aero-engine R&D efficiency.

Keywords: aero-engine R&D system; design; test; manufacturing; co-evolution; B-Z reaction

0 引言

航空发动机被誉为“皇冠上的明珠”、飞机的“心脏”^[1], 其性能是飞机运载能力、飞行速度、航程长短以及安全可靠性等关键性能的决定因素, 其发展水平是一个国家科技发展水平、工业基础能力和综合国力的集中表现^[2-3]. 鉴于航空发动机的重要程度, 各国均在积极探索和追求航空发动机研制的可

持续发展, 纷纷制定相应的战略规划和产业政策^[4-6]. 目前, 能够完全自主研发航空发动机的国家只有美、英、法、俄和中国等少数国家. 我国经过长期的探索, 基本建立了比较完整的航空发动机研制体系, 但是, 相较于其他几个国家的发展仍显落后^[7], 研制协同不足仍然是我国航空发动机研制实践中亟待解决的关键问题^[8-9].

收稿日期: 2025-06-18; 录用日期: 2025-10-14.

基金项目: 国防科技战略先导计划项目 (19-ZLXD-08-24-01-220-01).

责任编委: 李登峰.

†通信作者. E-mail: 1270420762@qq.com.

航空发动机研制是指通过基础研究、子系统设计、整机集成设计、原材料加工、零部件加工、整机集成等系列活[10],生产制造出满足使用需求及性能要求的航空发动机产品。航空发动机研制工作是一项极为复杂的系统工程。关于航空发动机研制的研究,部分学者基于软件和数字化技术,通过模型构建、仿真等方法展开协同设计研究,提出了将设计和制造结合起来促进研制的发展[11-15];一些学者从先进技术和材料等角度入手,强调了关键技术进步、零部件研制以及生产数据对于航空发动机研制能力提升的影响[16-19];部分学者还提出必须加强试验验证的能力建设[20]、航空发动机装配性优化[21],从而推动航空发动机研制;另外,有学者从并行协同研制模式[22-23]、异地协同结构[24]、协同平台搭建[25-26]等方面提出了加强航空发动机研制协同发展,从而降低研制成本和周期。综合来看,学者对航空发动机研制的研究不断深入,也取得了很多成果,但是,主要是针对航空发动机研制的某个阶段或局部环节,对于航空发动机研制系统全过程全要素的综合性研究较少,且多以定性分析为主,缺乏能够量化各环节协同关系以及政策影响的定量化模型研究。

结合航空发动机产品的实现过程和系统工程理论,就航空发动机研制过程而言,本文重点关注航空发动机研制系统的设计、试验和制造3大阶段[27-29]。在当前体制下,航空发动机研制的3大阶段彼此独立又互相影响。航空发动机设计的水平高低会影响制造阶段和试验阶段是否能够顺利进行,而航空发动机制造活动的成果和效果也会对设计阶段和试验阶段产生影响,航空发动机的试验能力水平和试验结果又会对设计阶段和制造阶段形成反馈[30-31]。因此,实现航空发动机研制系统中设计、试验与制造3个阶段的协同,即实现了整个研制系统的协同。另外,鉴于中国体制的特殊性,航空发动机研制系统作为一个开放性系统,促进我国航空发动机研制的发展离不开政府政策的引导[32-33]。政策导向是影响我国航空发动机研制系统协同演化的重要因素之一。

综上,针对现有关于航空发动机研制系统的研究主要聚焦于单一研制阶段、缺乏定量模型、政策效应未量化等核心问题,本文通过将航空发动机研制各阶段联合起来展开系统研究,探索我国航空发动机研制各阶段的协同演化关系、最优研制模式和政策效应,为促进我国航空发动机研制的可持续发展提供方向策略。本研究结合协同学理论,借鉴B-Z化学反应,首先,构建由设计活动、试验活动与制造活

动协同演化的序变协同模型,以实现我国航空发动机研制各阶段协同的定量描述;然后,基于演化方程组,通过仿真模拟不同初始状态和强弱政策导向下的演化规律,对我国航空发动机研制系统协同演化关系进行阐述,揭示多活动协同演化关系和政策调控机制。本研究尝试弥补当前航空发动机研制系统研究缺乏综合性定量模型构建方面的不足,为航空发动机研制系统协同演化提供新的研究思路,为提升我国航空发动机研制效率提供问题解决方向,同时,也为政策调控和政策效果仿真提供理论依据。

1 模型构建

1.1 模型基础

B-Z (Belousov-Zhabotinskii) 反应是指丙二酸等有机酸在金属铈离子作为催化剂时被溴酸氧化的一系列复杂化学反应的总称[34],是复杂性科学研究的重点模型之一[35]。B-Z反应系统是典型的具有自组织特征的系统,航空发动机研制系统协同演化研究可通过B-Z反应进行分析。首先,航空发动机研制系统是一个开放系统,具有自组织特点且其中各主体均发挥功能,但是并不存在有序行为[36];其次,航空发动机系统的各要素互相协作,可提高研制效率,具有协同效应,航空发动机研制系统的运行特点与B-Z反应过程非常相似,故通过B-Z反应构建基于我国航空发动机研制系统协同演化模型。

借鉴B-Z反应原理,可利用系统演化方程来模拟系统演化,故使用Logistic方程模拟我国航空发动机研制系统演化过程,定义 s_1 、 s_2 和 s_3 分别为我国航空发动机研制系统运行过程中,设计活动、试验活动和制造活动3个状态变量, $ds_i/dt(i=1,2,3)$ 为状态变量随时间变化的变化率; α 、 β 和 γ 分别为我国航空发动机研制系统中设计活动 s_1 、试验活动 s_2 、制造活动 s_3 的调整参数; θ 为控制变量,即政策导向对我国航空发动机研制系统研制效率促进作用的综合水平,因此, θ 为 s_1 、 s_2 、 s_3 这3个状态变量的共同控制变量。借鉴相关学者对系统演化的研究[37],可得到我国航空发动机研制系统协同演化过程的变量和参数如表1所示。

1.2 模型建立

1) 我国航空发动机研制系统中设计活动状态的Logistic方程。设计活动不仅是我国航空发动机研制系统的重要功能之一,也是航空发动机研制过程中的关键变量。在我国航空发动机研制系统运行过程中,设计活动是指中国航空发动机集团内部设计单位、航空类高校和相关科研院所等航空发动机设

表1 我国航空发动机研制系统演化的主要变量和参数

变量	变量名称	变量解释
状态变量1	设计活动状态: s_1	反映我国航空发动机研制系统运行协同过程中的设计能力
状态变量2	试验活动状态: s_2	反映我国航空发动机研制系统运行协同过程中的试验能力
状态变量3	制造活动状态: s_3	反映我国航空发动机研制系统运行协同过程中的制造能力
控制变量	政策导向: θ	描述政策导向对我国航空发动机研制系统研制活动影响的强弱水平
调整参数1	设计活动水平指数: α	衡量我国航空发动机研制系统运行协同过程中的设计水平, 通过相关指标进行测量
调整参数2	试验活动水平指数: β	衡量我国航空发动机研制系统运行协同过程中的试验水平, 通过相关指标进行测量
调整参数3	制造活动水平指数: γ	衡量我国航空发动机研制系统运行协同过程中的制造水平, 通过相关指标进行测量

计主体进行的基础预研、子系统设计和整机设计等活动. 航空发动机制造活动作为设计活动成果的直接转化和服务对象, 伴随航空发动机研制系统的持续运行, 航空发动机产品趋于成熟, 性能、稳定性和可靠性等要求提高, 对于设计水平和能力的要求也进一步提高, 会促进设计主体间以及同制造主体间的交流和互动, 以便更好地满足制造要求, 从而促进设计能力水平提升, 且在制造过程中通过不断地试错和检验, 为航空发动机研制系统中的设计活动种群提供新的设计方向和灵感, 提升中国航空发动机设计效率和效果. 航空发动机试验主体将试验活动结果反馈给设计主体, 进一步促进了设计获得的优化和完善, 同时, 试验数据的积累对于设计活动也有积极的推动作用, 但是, 航空发动机试验需要的资金投入占研制活动总投入高达 50% 以上, 在资源有限的情况下, 试验活动与设计活动存在强竞争关系^[38]. 航空发动机研制内外部环境复杂多变, 来自我国航空发动机研制的政策导向也会对设计活动产生积极影响. 综上分析, 航空发动机设计活动状态的 Logistic 方程可表示为

$$\frac{1}{\alpha} \frac{ds_1}{dt} = \theta s_1 + \theta \frac{\beta}{\alpha} s_2 - \beta s_1 s_2 + \gamma s_1 s_3. \quad (1)$$

其中: θs_1 为在政策导向作用下航空发动机设计活动的自身影响作用; $\theta \frac{\beta}{\alpha} s_2$ 为在政策导向作用下航空发动机试验活动对设计活动的促进作用; $-\beta s_1 s_2$ 为在资源有限情况下, 试验活动与设计活动间竞争关系的强度; $\gamma s_1 s_3$ 为航空发动机制造活动对设计活动的推动作用.

2) 我国航空发动机研制系统中试验活动状态的 Logistic 方程. 航空发动机试验活动主要是对制造活动过程及成果进行测试和试验, 完成并通过试验活动的制造产品才能进一步投入应用. 中国航空发动机集团内部单位、高校、科研院所以及配套企业是我国主要的航空发动机研制主体. 航空发动机试验是对设计或制造过程和成果进行的试验, 设计活动

和制造活动是试验活动的前提. 良好的设计活动状态和制造活动状态有利于试验活动的发展, 伴随设计活动和制造活动水平的提升, 相应地会对试验活动的水平提出更高的要求, 促使试验主体加强与设计和制造主体间的沟通交流, 并主动提高自身试验能力以满足试验要求. 而我国航空发动机研制的政策导向也会对试验活动状态产生影响. 基于此, 中国航空发动机试验活动状态的 Logistic 方程可表示为

$$\frac{1}{\beta} \frac{ds_2}{dt} = \theta s_2 + \theta \frac{\alpha}{\beta} s_1 + \frac{\gamma}{\beta} s_3. \quad (2)$$

其中: θs_2 为在政策导向作用下航空发动机试验活动的自身影响作用, $\theta \frac{\alpha}{\beta} s_1$ 为在政策导向作用下航空发动机设计活动对试验活动的影响, $\frac{\gamma}{\beta} s_3$ 为航空发动机制造活动对试验活动的促进作用.

3) 我国航空发动机研制系统中制造活动状态的 Logistic 方程. 航空发动机制造是航空发动机研制系统的重要一环, 是将航空发动机设计进行应用并得到航空发动机新产品的过程, 集中体现了航空发动机研制的效果. 中国航空发动机集团内部制造单位、相关上下游配套企业和科研院所等是主要的航空发动机制造主体. 航空发动机设计活动是制造活动的基础, 特别是新产品制造活动的基础, 我国航空发动机研制系统中设计水平的高低决定了制造产品的先进性、可靠性和稳定性, 设计活动对于制造活动具有显著的促进作用. 航空发动机试验活动主要是针对制造产品的试验, 然后将试验结果反馈给设计主体, 从而有效促进设计活动的优化和完善, 对于制造活动不具有直接的影响. 另外, 制造活动作为产品和技术的直接呈现途径, 中国航空发动机系统运行内生动力能够有效促进制造活动的发展. 综上分析, 中国航空发动机制造活动状态的 Logistic 方程可表示为

$$\frac{1}{\gamma} \frac{ds_3}{dt} = \varphi_1 s_3 + \varphi_2 \theta \frac{\alpha}{\gamma} s_1. \quad (3)$$

其中: $\varphi_1 s_3$ 为在中国航空发动机制造活动的自身因素的影响作用大小, φ_1 为常数 (通常 $\varphi_1 \geq 1$), 表示我国航空发动机研制系统内生动力促进制造活动; $\varphi_2 \theta \frac{\alpha}{\gamma} s_1$ 表示在政策导向的作用下航空发动机设计活动状态对制造活动状态的促进作用, φ_2 为常数 (通常 $\varphi_2 \geq 1$).

根据上述分析, 可得到我国航空发动机研制系统协同的三维 Logistic 方程为

$$\begin{cases} \frac{1}{\alpha} \frac{ds_1}{dt} = \theta s_1 + \theta \frac{\beta}{\alpha} s_2 - \beta s_1 s_2 + \gamma s_1 s_3, \\ \frac{1}{\beta} \frac{ds_2}{dt} = \theta s_2 + \theta \frac{\alpha}{\beta} s_1 + \frac{\gamma}{\beta} s_3, \\ \frac{1}{\gamma} \frac{ds_3}{dt} = \varphi_1 s_3 + \varphi_2 \theta \frac{\alpha}{\gamma} s_1. \end{cases} \quad (4)$$

其中: 通常 $\varphi_1 \geq 1$, 为了表示在无外作用下我国航空发动机研制系统内实际制造活动呈现稳定上升的趋势, 即我国航空发动机研制系统内生动力促进制造活动, 本文假设 $\varphi_1 = 2$, 表明我国航空发动机研制过程中制造活动的上升趋势和内生促进作用并非微弱或过度强化, 符合 2012 年 ~ 2021 年我国航空发动机总产值年均增速约 12.3% (《中国高技术统计年鉴》数据) 的实际发展规律; 通常 $\varphi_2 \geq 1$, 为了体现我国航空发动机研制系统中制造活动与设计活动间的协同效应, 促进研制系统朝着稳定有序演进发展, 本文假设 $\varphi_2 = 2$, 表明我国航空发动机研制过程中设计活动对于制造活动的作用并非微弱或过度强化.

综上所述, 运行方程 (4) 可得到我国航空发动机研制系统协同过程的三维 Logistic 方程为

$$\begin{cases} \frac{ds_1}{dt} = \alpha \theta s_1 + \beta \theta s_2 - \alpha \beta s_1 s_2 + \alpha \gamma s_1 s_3, \\ \frac{ds_2}{dt} = \beta \theta s_2 + \alpha \theta s_1 + \gamma s_3, \\ \frac{ds_3}{dt} = 2\gamma s_3 + 2\alpha \theta s_1. \end{cases} \quad (5)$$

1.3 稳定性分析

在我国航空发动机研制系统运行协同过程中, 在系统内外部因素的综合作用下, 会出现微弱的涨落现象. 根据协同学理论, 微涨落现象的出现可能会使得控制变量突破阈值条件, 从而实现多主体合作下我国航空发动机研制系统从无序向有序发展. 为获取我国航空发动机研制系统运行协同的阈值条件, 借鉴相关学者的研究^[37, 39], 本文采用协同学中的线性稳定性分析求解系统运行的阈值和平衡点.

根据方程组 (5), 设置扰动项方程组表达式为

$$\begin{cases} s_1 = s_1^0 + x_1, \\ s_2 = s_2^0 + x_2, \\ s_3 = s_3^0 + x_3. \end{cases} \quad (6)$$

其中: $x_i (i = 1, 2, 3)$ 为定态解的微小扰动; 假设 $s_1^0 = s_2^0 = s_3^0 = 0$, 通过线性稳定性分析, 可得到方程

$$\begin{cases} \frac{ds_1}{dt} = \alpha \theta s_1 + \beta \theta s_2, \\ \frac{ds_2}{dt} = \beta \theta s_2 + \alpha \theta s_1 + \gamma s_3, \\ \frac{ds_3}{dt} = 2\gamma s_3 + 2\alpha \theta s_1. \end{cases} \quad (7)$$

将方程 (7) 改为矢量形式, 有

$$\frac{ds}{dt} = Ls, \quad (8)$$

这里 $L = \begin{bmatrix} \alpha \theta & \beta \theta & 0 \\ \alpha \theta & \beta \theta & \gamma \\ 2\alpha \theta & 0 & 2\gamma \end{bmatrix}$, 则特征方程为

$$(L - \lambda I)s = 0, \quad (9)$$

即 $\begin{vmatrix} \alpha \theta - \lambda & \beta \theta & 0 \\ \alpha \theta & \beta \theta - \lambda & \gamma \\ 2\alpha \theta & 0 & 2\gamma - \lambda \end{vmatrix} = 0$. 因此, 求解方程可得到

$$\lambda^3 - (\alpha \theta + \beta \theta + 2\gamma)\lambda^2 + 2\gamma \theta (\alpha + \beta)\lambda - 2\alpha \beta \gamma \theta^2 = 0. \quad (10)$$

根据 Hurwitz 稳定性判据, 系统实现稳定状态需要满足以下条件:

- 1) 特征方程的系数全为正数;
- 2) Hurwitz 行列式及其主子式的值均为正数.

由式 (10) 可见, 特征方程的系数显然存在负数, 因此, 我国航空发动机研制系统肯定不满足协同学理论中系统实现稳定状态的相关条件, 我国航空发动机研制系统运行协同过程不存在阈值条件, 这符合现实情形下开放式研制活动的情况. 为进一步剖析我国航空发动机研制系统运行协同规律, 通过仿真完成进一步的探讨.

2 研究方法与分析

2.1 变量测度与数据收集

通过大量现有相关文献查阅以及与专家多次讨论, 针对我国航空发动机研制系统协同演化设计测量设计活动、试验活动、制造活动、政策导向的相关指标体系. 其中: 对于中国航空发动机设计活动构建包括设计开发经费投入、新产品开发项目数量、发明专利申请数量、设计软件数量、设计工艺优化项数等 5 个题项^[40-41]; 对于中国航空发动机试验活动构建包括实际试验运行时间、试验活动经费投入、试验

人员当时当量、新增试验设备等4个题项^[42-43];对于中国航空发动机制造活动构建包括技术改造经费、航空发动机总产值、航空发动机用先进材料总产量、新增制造设备原值、航空发动机相关科技人员数量、设备负荷率等6个题项^[44-46];对于政策导向构建拨投资占研制总经费比重、R & D经费加计扣除减免税、航发及相关企业减免税、文件政策等7个题项^[47-48].

本文以《中国统计年鉴》《中国高技术统计年鉴》和《中国科技统计年鉴》等统计年鉴中2012年~2021年10年间我国航空发动机研制的相关数据,保证了数据的时效性和权威性,根据表2中计算公式得到调整参数 α 、调整参数 β 、调整参数 γ 和控制变量 θ 的计算数值.最终确认得到 $\alpha = 0.878$, $\beta = 0.759$, $\gamma = 0.748$, $\theta = 0.737$.

表2 相关参数计算

变量名称	变量	变量解释
控制变量	$\theta = \sqrt{\prod_{i=1}^n \frac{\theta_i}{\bar{\theta}_i} w_{\theta_i}}$	反映政策导向综合指数, θ_i 为政策导向各题项得分, $\bar{\theta}_i$ 为各题项平均值, w_{θ_i} 为指标权重系数
调整参数1	$\alpha = \sqrt{\prod_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{\bar{\alpha}_i} w_{\alpha_i}}$	反映设计水平, α_i 为设计能力各年的得分, $\bar{\alpha}_i$ 为得分的平均值, w_{α_i} 为指标权重系数
调整参数2	$\beta = \sqrt{\prod_{i=1}^n \frac{\beta_i}{\bar{\beta}_i} w_{\beta_i}}$	反映制造水平, β_i 为制造能力各年的得分, $\bar{\beta}_i$ 为得分的平均值, w_{β_i} 为指标权重系数
调整参数3	$\gamma = \sqrt{\prod_{i=1}^n \frac{\gamma_i}{\bar{\gamma}_i} w_{\gamma_i}}$	反映试验水平, γ_i 为试验能力各年的得分, $\bar{\gamma}_i$ 为得分的平均值, w_{γ_i} 为指标权重系数

2.2 仿真模拟及结果分析

2.2.1 仿真设置

为更加清晰地揭示我国航空发动机研制系统运行协同规律,本文利用现有统计年鉴数据进行仿真分析.设3个状态变量的初始状态为 $S_0 = [S_{01}, S_{02}, S_{03}]$,取值范围为 $[0, 1]$.通过利用3个状态的微分方程,得到我国航空发动机研制系统协同过程如图1所示.为加强仿真结果的可信度,在采用编程进行仿真过程中,考虑多种初始条件,对3个要素初始条件在区间 $[0, 1]$ 内,以步长0.1重复实验 $11 \times 11 \times 11$ 次,得到研制系统的协同情况.由图1可见,在我国航空发动机研制系统中,设计活动、制造活动和试验活动3个状态实现了协同发展,在初始状态下,3个要素均处于较低的水平,但是,随着我国航空发动机研制系统的不断运行,3个要素的水平均得到了显著提升.由此可见,我国航空发动机研制系统的3个种群(子系统)通过复杂的相互作用形成了协同效应,

推动了整个航空发动机研制系统的协同发展.

为进一步分析我国航空发动机研制系统中航空发动机设计活动状态、制造活动状态与试验活动状态间的协同关系以及我国航空发动机研制系统环境因素的影响,本文利用Matlab对式(5)进行仿真分析.对于初始状态的设置,考虑到我国航空发动机研制系统运行的实际情况,分别探讨在 $[1, 0, 0]$ 、 $[0, 0, 1]$ 、 $[1, 0, 1]$ 、 $[1, 1, 1]$ 共4种初始状态下的航空发动机研制系统协同过程.其中:初始状态 $[1, 0, 0]$ 表示产品研制初期阶段重点关注产品设计,体现了以设计活动为主的航空发动机设计研究院以及相关研究所在我国航空发动机研制系统运行过程中相对独立的活动状态;初始状态 $[0, 0, 1]$ 表示产品研制初期重点关注产品实现,体现了以制造活动为主的航空发动机制造厂以及上下游配套企业在我国航空发动机研制系统运行过程中的相对独立的活动状态;初始状态 $[1, 0, 1]$ 表示产品研制初期同时注重产品设计和产品实现,体现了设计制造一体化研制模式下中国航空发动机相关研制主体的活动状态;初始状态 $[1, 1, 1]$ 表示产品研制初期同时关注产品设计、试验条件和产品实现,代表了设计制造试验一体化研制模式下中国航空发动机相关研制主体的活动状态.前两种初始状态反映了厂所分离,即设计研究所与制造厂独立运作的体制背景下,各航空发动机研制主体各自独立发展的状态;后两种初始状态体现了对各研制主体综合统筹后,相对独立又紧密联系情况

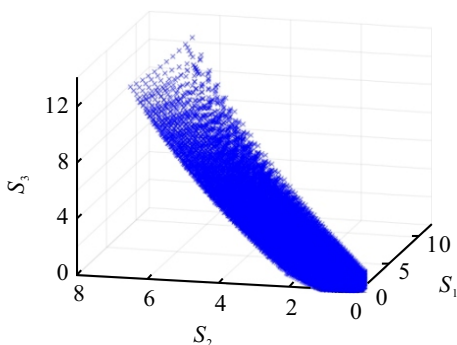


图1 我国航空发动机研制系统运行协同情况

下我国航空发动机研制活动发展状态. 不同初始状态契合我国航空发动机研制体系不同的发展状态, 能够很好地反映我国航空发动机研制系统不同阶段的协同过程, 对于探讨我国航空发动机研制系统协同规律具有重要意义, 因此, 本文主要针对 4 种不同的初始状态进行分析. 另外, 为考虑我国航空发动机研制系统环境因素对系统运行的影响, 在对控制变量本身取值进行分析的基础上, 设定 $\theta_L = 0.1$ 表示我国航空发动机研制系统运行过程中受到政策导向作用的强度较低, 设定 $\theta_H = 1.0$ 表示我国航空发动机研制系统运行过程中受到政策导向作用的强度较高.

2.2.2 以设计活动为主的仿真分析

对于初始状态 $[1, 0, 0]$, 将参数代入方程组 (5), 利用 Matlab 2022 进行编程得到仿真结果如图 2 所示. 图 2 结果表明: 我国航空发动机研制系统中的设计活动、制造活动和试验活动均呈现出协同上升趋势, 但是, 总体上设计活动和制造活动增长趋势明显, 且增长速度由慢到快, 而试验活动的增长趋势相对平缓. 这表明在产品研制初期, 只考虑设计活动的状态下, 航空发动机制造活动和试验活动会随着时间推移不断上升, 表明设计活动、试验活动与制造活动间的协同作用. 另外, 由于设计活动的发展需要制造活动和试验活动提供大量数据和经验的积累, 设计活动在中后期呈现出快速增长的趋势.

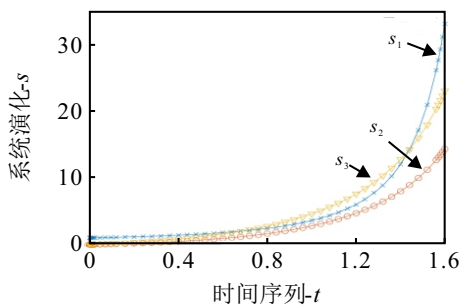


图2 初始状态 $[1, 0, 0]$ 下我国航空发动机研制系统运行的协同演化

在对初始状态 $[1, 0, 0]$ 进行仿真的基础上, 考虑我国航空发动机研制系统政策导向对于该初始状态下我国航空发动机研制系统协同的影响, 改变控制变量 θ 的值, 选取弱政策导向作用 $\theta_L = 0.1$ 与强政策导向作用 $\theta_H = 1.0$ 进行对比分析, 弱政策导向作用下的仿真结果如图 3 所示. 图 3 结果表明: 在弱政策导向作用下, 随着时间的发展和系统不断运行, 中国航空发动机设计、制造和试验活动均存在协同上升趋势, 但是协同趋势较弱, 协同发展的速度也较慢. 强政策导向作用下的仿真结果如图 4 所示. 图 4 结果表明: 在强政策导向作用下, 中国航空发动机设

计、制造和试验活动存在显著协同上升趋势, 且协同趋势较强, 协同发展的速度也较快. 以同一时间节点来看, 当 $t = 1.6$ 时, 强政策导向作用下 3 个要素状态均明显优于弱政策导向作用的情形. 基于此, 政策导向在我国航空发动机研制系统中发挥重要作用, 且强政策导向作用对于研制初期重点关注产品设计情形下我国航空发动机研制系统协同发展具有显著的推动作用.

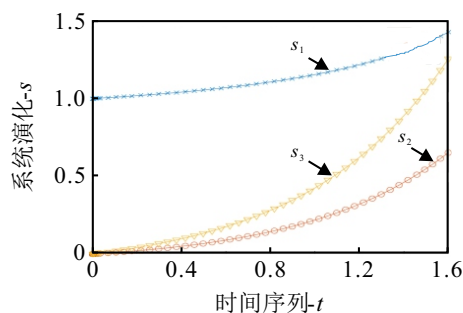


图3 在初始状态 $[1, 0, 0]$ 、弱政府政策导向下我国航空发动机研制系统运行的三要素协同演化

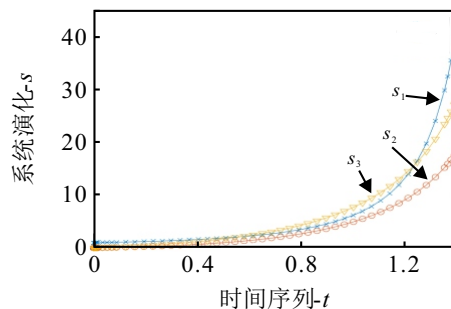


图4 在初始状态 $[1, 0, 0]$ 、强政府政策导向下我国航空发动机研制系统运行的三要素协同演化

2.2.3 以制造活动为主的仿真分析

对于初始状态 $[0, 0, 1]$, 将参数代入方程组 (5), 利用 Matlab 2022 进行编程得到仿真结果如图 5 所示. 图 5 结果表明: 我国航空发动机研制系统中的设计活动、制造活动和试验活动均呈现出协同上升趋势, 与初始状态 $[0, 0, 1]$ 相似, 总体上设计活动、制造活动和试验活动均呈现增长趋势, 但是设计活动和制造活动增长较为明显, 且增长速度由慢到快, 而试验活动的增长趋势相对平缓. 这表明在产品研制初期, 只考虑制造活动的状态下, 航空发动机设计活动和试验活动也会随着时间推移不断上升, 表明了设计活动、试验活动与制造活动间的协同作用. 具体来看, 对比初始状态 $[1, 0, 0]$ 的情况, 图 5 中: 在 $t < 1.6$ 阶段, 设计活动发展明显弱于制造活动与试验活动, 且在同一时间节点 $t = 1.6$ 时, 初始状态 $[0, 0, 1]$ 下制造活动状态反而明显低于图 2 中的制造活动状态, 这表明在研制初期仅注重产品的实现过程, 而忽视

设计活动的发展,不利于整个航空发动机研制系统的整体发展,这反映出我国早期迫于国内科技水平和外部环境压力,实行以仿制为主的航空发动机研制模式不能适应航空发动机长远发展的需要,进一步验证了由基础研究到应用研究的科学发展规律。

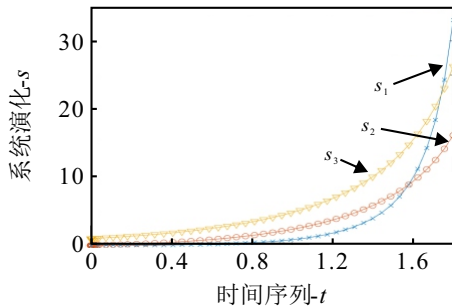


图5 初始状态 $[0, 0, 1]$ 下我国航空发动机研制系统运行的协同演化

同样,在对初始状态 $[0, 0, 1]$ 进行仿真的基础上,考虑我国航空发动机研制系统政策导向对于该初始状态下我国航空发动机研制系统协同的影响,改变控制变量 θ 的值,选取弱政策导向作用 $\theta_L = 0.1$ 与强政策导向作用 $\theta_H = 1.0$ 进行对比分析,弱政策导向作用下的仿真结果如图6所示。图6结果表明:在弱政策导向作用下,随时间发展和系统不断运行,中国航空发动机设计、制造和试验活动均存在协同上升趋势,但是协同趋势较弱,协同发展的速度也较慢。强政策导向作用下的仿真结果如图7所示。图7结果表明:在强政策导向作用下,中国航空发动机设计、制造和试验活动均存在显著协同上升趋势,且协同趋势较强,协同发展的速度也较快。另外,由图6可见,在弱政策导向作用下,设计活动发展尤其缓慢,这表明在初始阶段只考虑制造活动的状态下,完全依靠市场作用难以实现设计活动的快速发展,体现了政府政策统筹的重要性。综合图5~图7来看,政策导向在我国航空发动机研制系统中发挥了重要作用,且强政策导向作用对于研制初期重点关注产品实现情形下我国航空发动机研制系统协同发展具有显著的推动作用。

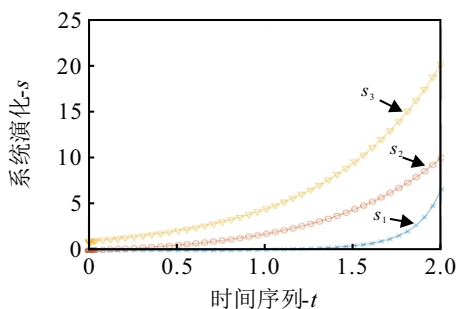


图6 在初始状态 $[0, 0, 1]$ 、弱政府政策导向下我国航空发动机研制系统运行的三要素协同演化

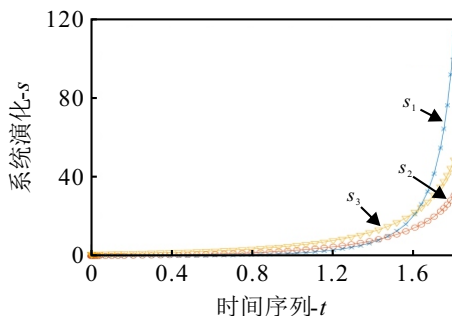


图7 在初始状态 $[0, 0, 1]$ 、强政府政策导向下我国航空发动机研制系统运行的三要素协同演化

设计、制造和试验活动存在显著协同上升趋势,且协同趋势较强,协同发展的速度也较快。另外,由图6可见,在弱政策导向作用下,设计活动发展尤其缓慢,这表明在初始阶段只考虑制造活动的状态下,完全依靠市场作用难以实现设计活动的快速发展,体现了政府政策统筹的重要性。综合图5~图7来看,政策导向在我国航空发动机研制系统中发挥了重要作用,且强政策导向作用对于研制初期重点关注产品实现情形下我国航空发动机研制系统协同发展具有显著的推动作用。

2.2.4 设计制造一体化的仿真分析

对于初始状态 $[1, 0, 1]$,将参数代入方程组(5),利用 Matlab 2022 进行编程得到仿真结果如图8所示。图8结果表明:我国航空发动机研制系统中的设计活动、制造活动和试验活动均呈现出协同上升趋势。对比图8与图2可以发现,初始状态 $[1, 0, 0]$ 与初始状态 $[1, 0, 1]$ 情形下的系统演化曲线走向(协同趋势)大致相同,但是,初始状态 $[1, 0, 1]$ 情形下的协同发展速度和强度明显较快,在同等协同发展水平下,初始状态 $[1, 0, 1]$ 情形下的系统运行时间少了 0.4 个时间点。这表明设计制造一体化研制模式更有利于我国航空发动机研制系统运行的协同发展。

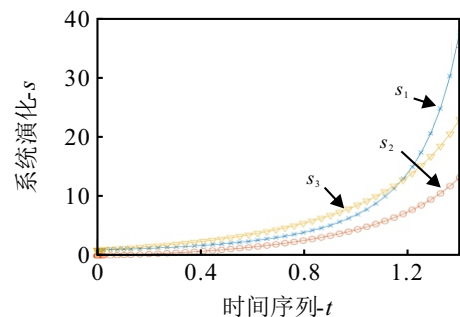


图8 初始状态 $[1, 0, 1]$ 下我国航空发动机研制系统运行的协同演化

同样,在对初始状态 $[1, 0, 1]$ 进行仿真的基础上,考虑我国航空发动机研制系统政策导向对于该初始状态下我国航空发动机研制系统协同的影响,改变控制变量 θ 的值,选取弱政策导向作用 $\theta_L = 0.1$ 与强政策导向作用 $\theta_H = 1.0$ 进行对比分析,弱政策导向作用下的仿真结果如图9所示。图9结果表明:在弱政策导向作用下,随着时间发展和系统不断运行,中国航空发动机设计、制造和试验活动均存在协同上升趋势,但是协同趋势相对较弱,协同发展的速度也相对较慢。强政策导向作用下的仿真结果如图10所示。图10结果表明:在强政策导向作用下,中国航空发动机设计、制造和试验活动存在显著协同上升趋势,且协同趋势较强,协同发展的速度也较快。

势,且协同趋势较强,协同发展的速度也较快.由图9可见,在设计制造一体化研制模式下,尽管在政府政策导向作用很弱的情况,我国航空发动机研制能力体系仍然能够实现较好的协同发展.对比图9与图10可以发现,在强政府政策导向作用下,我国航空发动机研制系统各要素水平明显优于弱政府政策导向,表明政策导向在我国航空发动机研制系统中发挥了重要作用,且强政策导向作用对于研制初期同时关注产品设计和产品实现情形下我国航空发动机研制系统协同发展具有显著的推动作用,能够快速推动我国航空发动机研制系统协同发展.

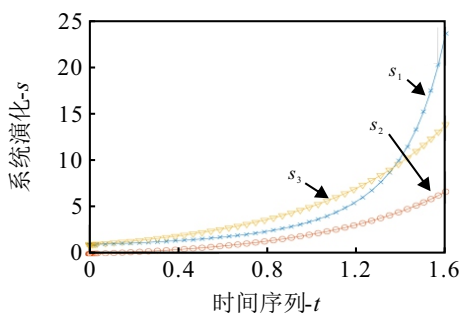


图9 在初始状态 [1, 0, 1]、弱政府政策导向下我国航空发动机研制系统运行的三要素协同演化

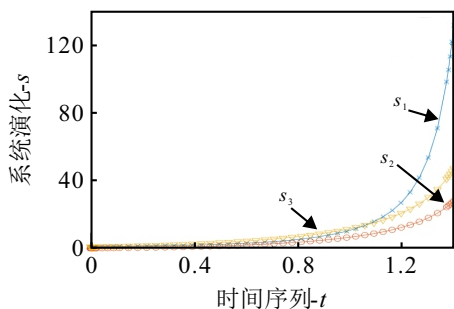


图10 在初始状态 [1, 0, 1]、强政府政策导向下我国航空发动机研制系统运行的三要素协同演化

2.2.5 设计试验制造一体化的仿真分析

对于初始状态[1, 1, 1],将参数代入方程组(5),利用 Matlab 2022 进行编程得到仿真结果如图11所示.图11结果表明:我国航空发动机研制系统中的设计活动、制造活动和试验活动均呈现出协同上升趋势.对比图11与图8、图2可以发现,初始状态[1, 1, 1]与初始状态[1, 0, 1]、[1, 0, 0]情形下的系统演化曲线走向(协同趋势)大致相同.其中:相比于初始状态[1, 0, 0],初始状态[1, 1, 1]情形下的协同发展速度和强度明显较好;但是相比于初始状态[1, 0, 1],初始状态[1, 1, 1]情形下的协同发展速度和强度却相对较弱,在同等时间节点 $t = 1.2$ 时,初始状态[1, 1, 1]情形下的制造活动值只有17左右,而初始状态[1,

0, 1]情形下的制造活动已达到23左右.这表明相比于设计制造一体化研制模式,设计制造试验一体化研制模式下,将三大要素综合在一起后反而会不利于系统的长期快速发展.结合实际情况,航空发动机试验活动耗费时间长、投资大,试验经费占航空发动机研制总经费高达50%左右,在资源有限的情况下,试验活动与设计活动和制造活动间存在较强的竞争关系,从而导致在设计试验制造一体化研制模式下,试验活动对其他要素以及系统运行产生一定的抑制和阻碍效果.因此,将试验活动相对独立于设计活动和制造活动之外,有利于整个航空发动机研制系统的运行和发展.

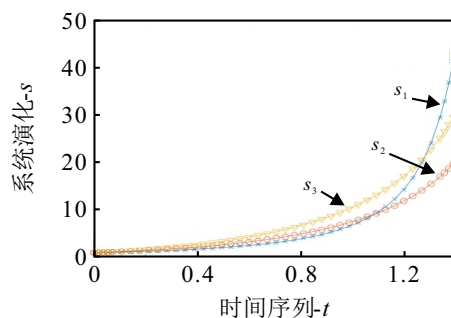


图11 初始状态 [1, 1, 1] 下我国航空发动机研制系统运行的协同演化

同样,在对初始状态[1, 1, 1]进行仿真的基础上,考虑我国航空发动机研制系统政策导向对于该初始状态下我国航空发动机研制系统协同的影响,改变控制变量 θ 的值,选取弱政策导向作用 $\theta_L = 0.1$ 与强政策导向作用 $\theta_H = 1.0$ 进行对比分析,弱政策导向作用下的仿真结果如图12所示.图12结果表明:在弱政策导向作用下,随着时间发展和系统不断运行,中国航空发动机设计、制造和试验活动均存在协同上升趋势,但是协同趋势相对较弱,协同发展的速度也相对较慢.强政策导向作用下的仿真结果如图13所示.图13结果表明:在强政策导向作用下,中国航空发动机设计、制造和试验活动存在显著协同上升趋势,且协同趋势较强,协同发展的速度也较快.对比图12与图13可以发现,在强政府政策导向作用下,我国航空发动机研制系统各要素水平明显优于弱政府政策导向,表明政策导向在我国航空发动机研制系统中发挥了重要作用,且强政策导向作用对于研制初期同时关注产品设计、产品实现和试验活动情形下我国航空发动机研制系统协同发展具有显著的推动作用,能够快速推动我国航空发动机研制系统协同发展.另外,对比图13与图10可以发现,在强政府规制作用下,初始状态[1, 0, 1]情形相比于

初始状态 $[1, 1, 1]$ 情形,各要素水平明显较高,协同发展状态更优,结合上文对实际控制变量 θ 值下初始状态 $[1, 0, 1]$ 情形与初始状态 $[1, 1, 1]$ 情形对比分析结果,表明在设计制造试验一体化研制模式下,强政府规制作用能够有效缓解试验活动对其他要素的抑制作用,这是因为在强政府规制作用下,政府通过宏观调控能够实现资源的合理配置,有效统筹各要素综合发展。

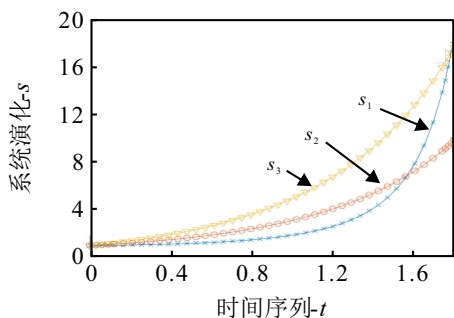


图12 在初始状态 $[1, 1, 1]$ 、弱政府政策导向下我国航空发动机研制系统运行的三要素协同演化

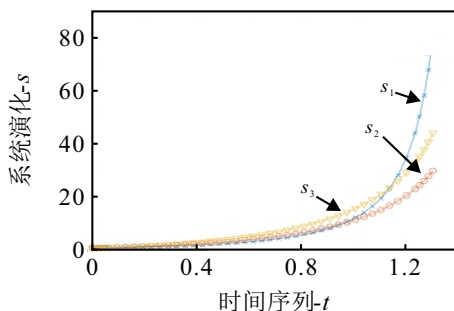


图13 在初始状态 $[1, 1, 1]$ 、强政府政策导向下我国航空发动机研制系统运行的三要素协同演化

综合上述仿真分析,研究结果表明:

1) 在环境规制作用下,我国航空发动机研制能力系统能够实现整体的协同发展,且随着时间推进,航空发动机设计活动与制造活动间的协同关系更为显著。

2) 不同研制模式下的航空发动机研制能力系统运行协同过程存在差异.其中:在设计制造一体化研制模式下我国航空发动机研制能力系统运行协同速度和强度最优,而以产品实现的制造活动为主的研制模式下我国航空发动机研制能力系统运行协同效果最差.同时,航空发动机设计活动是我国航空发动机研制能力系统协同演化的关键因素,是系统的序参量。

3) 在考虑政府环境规制作用时,强政府环境规制作用下我国航空发动机研制能力系统运行的协同效果和要素水平均明显高于弱政府规制作用下的协同效果和要素水平,表明政府规制作用对于我国航

空发动机研制能力系统的协同演化具有很强的推动作用。

3 结论

本文借鉴 B-Z 反应并结合协同学相关理论,研究了我国航空发动机研制系统协同演化规律,以政策导向为控制变量,构建了设计活动、试验活动和制造活动的三维 Logistic 动态演化模型,并通过仿真分析了不同初始条件下的演化情况,并在政策导向强弱不同的状态下探究了航空发动机设计活动、试验活动与制造活动间的演化关系.研究结果表明:

1) 需要充分发挥航空发动机研制系统中各子系统(要素)间的合作关系,激发设计活动活力,更好地引领航空发动机研制系统的协同发展。

2) 设计制造一体化研制模式是当前适合我国航空发动机研制发展的研制模式,能够有效实现我国航空发动机研制能力提升,而设计制造试验一体化研制模式虽然也能有效实现我国航空发动机研制能力提升,但是需要政府发挥较强的规制作用,只有在强有力的宏观调控作用下才能实现研制系统运行和发展最优化。

3) 政府应适当加强航空发动机研制环境规制,制定促进航空发动机研制要素间协同可持续发展的实施细则,并进一步完善航空发动机研制激励机制,推动航空发动机研制系统协同发展。

通过以上分析和研究结论,对我国航空发动机研制发展具有以下启示:

1) 加强航空发动机设计活动能力建设.我国航空发动机研制历史上长期以仿制为主,进入 21 世纪后才开始探索自主研发道路,基础研究薄弱,设计能力不足,需要进一步加大科研投入,加强基础技术研究,促进产学研结合,深化研发设计创新,更好地促进我国航空发动机研制的发展。

2) 推广设计制造一体化研制模式.我国传统的“厂所分离”管理模式,航空发动机设计与制造由不同主体负责,产品统筹优化不足,研制效率不高,制约了研制能力的提升,需要推动设计与制造的协同发展,通过设计向后延伸,制造及工艺向前延伸等方式来实现技术、管理、质量等多层面的双向打通,更好地促进我国航空发动机研制系统快速发展。

3) 注重政策导向的作用.根据强弱政策导向的对比可知,我国航空发动机研制离不开政策的宏观调控,强政策导向不仅能够提高我国航空发动机研制系统的协同效率,还能有效缓解试验活动资源竞争抑制效应,国家有必要加强航空发动机产业政策

调控,促进资源合理配置。

本研究的主要内容如下:

1) 针对我国航空发动机研制系统的演化,结合协同学和 B-Z 反应,构建了 Logistic 动态演化方程,为航空发动机研制系统的研究提供了新视角和新方法,丰富了航空发动机研制系统协同发展的理论基础。

2) 针对航空发动机研制系统的协同演化分析,提出了设计制造一体化是最优研制模式,试验活动因资源竞争需要相对独立发展,强政策导向显著提升协同效率的同时,能够缓解试验活动资源竞争抑制效应等核心结论,为企业调整了研制策略,为国家强化航空产业政策调控提供了依据,促进了航空发动机研制效率提升。

3) 本文以我国航空发动机研制系统为研究对象展开了协同演化研究,为其他武器装备研制系统协同发展进行定量模型研究奠定了一定的基础。

研究的不足之处在于当前航空发动机研制能力的量化还不成熟,在今后研究中要进一步完善航空发动机研制能力的测度,建立更完整的指标体系。

参考文献 (References)

- [1] 刘大响,陈光. 航空发动机——飞机的心脏[M]. 第2版. 北京:航空工业出版社,2015.
(Liu D X, Chen G. Aeroengine — The heart of the aircraft[M]. The 2nd edition. Beijing: Aviation Industry Press, 2015.)
- [2] 金伟. “中国制造 2025”下航空工业的发展前景[J]. 国防科技工业, 2016(7): 48-51.
(Jin W. Development prospects of aviation industry under “Made in China 2025” [J]. National Defense Science and Technology Industry, 2016(7): 48-51.)
- [3] 刘大响,金捷,胡晓煜. 抓住大型飞机的历史机遇实现航空动力的创新发展[J]. 航空制造技术, 2008, 51(2): 26-29.
(Liu D X, Jin J, Hu X Y. Seize the historical opportunity of large aircraft to realize the innovative development of aviation power[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(2): 26-29.)
- [4] European Union. Clean sky 2 development plan (2021)[EB/OL]. (2022-03-01)[2022-03-15]. <https://www.clean-aviation.eu/clean-sky-2/demonstrators/clean-sky-2-development-plan>.
- [5] National Aeronautics and Space Administration. NASA aeronautics strategic implementation plan 2019 update[EB/OL]. (2019-03-15)[2022-02-15]. <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2015/11/sip-2019-v7-web.pdf>.
- [6] HM Government. Industrial strategy aerospace sector deal[EB/OL]. (2018-03-15)[2022-02-15]. https://assets.publishing.service.gov.uk/media/685bbd48c07c71e5a870979b/_Withdrawn__aerospace-sector-deal-printready.pdf.
- [7] 方昌德,彭友梅. 航空发动机的发展历程[M]. 北京:航空工业出版社,2007.
(Fang C D, Peng Y M. The development history of aeroengines[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2007.)
- [8] 向巧,黄劲东,胡晓煜,等. 航空动力强国发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(2): 106-112.
(Xiang Q, Huang J D, Hu X Y, et al. Research on aero engine empower development strategy[J]. China Engineering Sciences, 2022, 24(2): 106-112.)
- [9] 向巧. 走中国特色的通用航空发动机自主研发道路[J]. 航空动力, 2019(6): 8.
(Xiang Q. Developing general aviation engine with Chinese characteristics road[J]. Aviation Power, 2019(6): 8.)
- [10] 冯南平,向巧,沈荣骏,等. 航空发动机关键核心技术攻关的组织策略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(4): 222-229.
(Feng N P, Xiang Q, Shen R J, et al. Organization strategies of innovation forces for the breakthrough of key core technologies in aero-engine industry[J]. China Engineering Sciences, 2022, 24(4): 222-229.)
- [11] Jeschke P, Kurzke J, Schaber R, et al. Preliminary gas turbine design using the multidisciplinary design system MOPEDS[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 126(2): 258-264.
- [12] McDonald C F, Massardo A F, Rodgers C, et al. Recuperated gas turbine aeroengines — Part I: Early development activities[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2008, 80(2): 139-157.
- [13] McDonald C F, Massardo A F, Rodgers C, et al. Recuperated gas turbine aeroengines — Part II: Engine design studies following early development testing[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2008, 80(3): 280-294.
- [14] McDonald C F, Massardo A F, Rodgers C, et al. Recuperated gas turbine aeroengines — Part III: Engine concepts for reduced emissions, lower fuel consumption, and noise abatement[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2008, 80(4): 408-426.
- [15] Cheung J, Scanlan J, Wiseall S. Value driven design — An initial study applied to novel aerospace components in Rolls-Royce plc[C]. Collaborative Product and Service Life Cycle Management for a Sustainable World. London: Springer London, 2008.
- [16] Ballal D R, Zelina J. Progress in aeroengine technology (1939-2003)[J]. Journal of Aircraft, 2004, 41(1): 43-50.
- [17] Horoufi A, Boromand M. Design and construction of a microjet engine at amirkabir university of technology[C]. Proceedings of the 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Denver, 2009: 4921.
- [18] 王资璐. 航空材料研制企业构建智能制造体系的探讨[J]. 科技与创新, 2021(8): 29-31.
(Wang Z L. Discussion on the construction of intelligent

- manufacturing systems by aviation material development enterprises[J]. *Science, Technology and Innovation*, 2021(8): 29-31.)
- [19] 邵传金, 卢婷婷, 单行健, 等. 大涵道比发动机可靠性特征及国产新机研制需关注的重点问题研究[J]. *航空维修与工程*, 2021(5): 22-25.
(Shao C J, Lu T T, Shan X J, et al. Research on reliability characteristics of high bypass ratio engine and key issues in new domestic engine development[J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2021(5): 22-25.)
- [20] 贾银. 关于航空产品研制生产试验验证问题的探讨[J]. *航空标准化与质量*, 2008(1): 49-51.
(Jia Y. Discussion on the issues of R & D, oroduction, and test verification of aviation products[J]. *Aviation Standardization & Quality*, 2008(1): 49-51.)
- [21] 王怡琳, 刘鹏, 乔非, 等. 不确定环境下的航空发动机装配线适应性调度方法[J]. *控制与决策*, 2024, 39(5): 1629-1635.
(Wang Y L, Liu J, Qiao F, et al. Adaptive scheduling method of aero-engine assembly line in uncertain environment[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(5): 1629-1635.)
- [22] 沈晓东. 产品研制新模式深化并行协同[J]. *中国制造业信息化*, 2011(14): 27-28.
(Shen X D. Deepening concurrent collaboration for the new mode of product development[J]. *China Manufacturing Informatization*, 2011(14): 27-28.)
- [23] 慕博. 并行协同设计技术在航空产品研制中的应用[J]. *企业技术开发*, 2013, 32(Z3): 50-51.
(Mu B. Application of concurrent collaborative design technology in aviation product development[J]. *Enterprise Technology Development*, 2013, 32(Z3): 50-51.)
- [24] 李随科, 白思俊, 郭云涛, 等. 基于 Logistic 模型的型号研制异地协同模式[J]. *工业工程*, 2014, 17(1): 50-54.
(Li S K, Bai S J, Guo Y T, et al. Remote collaborative mode of model development based on logistic model[J]. *Industrial Engineering*, 2014, 17(1): 50-54.)
- [25] 郭荣飞, 陈伟, 李晓艳. 航空发动机生产过程设计制造协同研究与应用[J]. *内燃机与配件*, 2020(5): 16-18.
(Guo R F, Chen W, Li X Y. Research and application of collaboration between design and manufacturing in aeroengine production process[J]. *Internal Combustion Engines and Parts*, 2020(5): 16-18.)
- [26] 陶飞, 孙清超, 孙惠斌, 等. 航空发动机数字孪生工程: 内涵与关键技术[J]. *航空学报*, 2024, 45(21): 630283.
(Tao F, Sun Q C, Sun H B, et al. Aero-engine digital twin engineering: Connotation and key technologies[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(21): 630283.)
- [27] 吴大观. 我国航空发动机研制过程中的主要经验教训[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2001(4): 1-6.
(Wu D G. Primary experiences and lessons in China aero-engine development[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2001(4): 1-6.)
- [28] 刘廷毅. 航空发动机研制全寿命管理研究及建议[J]. *航空发动机*, 2012, 38(1): 1-6.
(Liu T Y. Research and suggestion on lifecycle management for aeroengine development[J]. *Aviation Power*, 2012, 38(1): 1-6.)
- [29] 曹建国. 航空发动机仿真技术研究现状、挑战和展望[J]. *推进技术*, 2018, 39(5): 961-970.
(Cao J G. Status, challenges and prospectives of aero-engine simulation technology[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(5): 961-970.)
- [30] 黄维, 黄春峰, 王永明, 等. 先进航空发动机关键制造技术研究[J]. *国防制造技术*, 2009(3): 42-48.
(Huang W, Huang C F, Wang Y M, et al. Key manufacturing technology research of advanced aero-engine[J]. *National Defense Manufacturing Technology*, 2009(3): 42-48.)
- [31] 陈军, 王栋, 封锋. 现代飞行器推进原理与进展[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
(Chen J, Wang D, Feng F. *Modern aircraft propulsion principles and progress*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.)
- [32] 刘永超. 新形势下关于加快航空发动机领域知识产权发展的思考[J]. *科技促进发展*, 2017, 13(3): 175-180.
(Liu Y C. Thinking of development of intellectual property in the aero enginefield under the new situation[J]. *Science & Technologyfor Development*, 2017, 13(3): 175-180.)
- [33] 尹泽勇, 秦亚欣, 李建榕, 等. 新时期我国民用航空发动机自主发展战略研究[J]. *中国工程科学*, 2023, 25(5): 185-191.
(Yin Z Y, Qin Y X, Li J R, et al. Independent development strategy of civil aero-engine in China in the new era[J]. *China Engineering Sciences*, 2023, 25(5): 185-191.)
- [34] 秦占奎. Belousov-Zhabotinsky 反应的协同描述[J]. *贵州大学学报: 自然科学版*, 1989(2): 121-127.
(Qin Z K. Synergistic description of the Belousov-Zhabotinsky reaction[J]. *Journal of Guizhou University: Natural Sciences*, 1989(2): 121-127.)
- [35] 叶伟巍, 梅亮, 李文, 等. 协同创新的动态机制与激励政策 —— 基于复杂系统理论视角[J]. *管理世界*, 2014(6): 79-91.
(Ye W W, Mei L, Li W, et al. Dynamic mechanisms and incentive policies of collaborative innovation: From the perspective of complex systems theory[J]. *Management World*, 2014(6): 79-91.)
- [36] 郭永辉, 冯媛, 陈薪宇, 等. 航空发动机关键核心技术突破的能力重构路径研究[J]. *科研管理*, 2025, 46(3): 81-90.
(Guo Y H, Feng Y, Chen X Y, et al. Research on capability reconstruction paths of the key and core technology breakthroughs for aero-engines[J]. *Science Research Management*, 2025, 46(3): 81-90.)
- [37] 张铁男, 韩兵, 张亚娟. 基于 B-Z 反应的企业系统协同演化模型[J]. *管理科学学报*, 2011, 14(2): 42-52.
(Zhang T N, Han B, Zhang Y J. Enterprise system co-evolution model based on "B-Z" reaction[J]. *Journal of*

- Management Sciences in China, 2011, 14(2): 42-52.)
- [38] 刘勇, 张静怡, 王朱程, 等. 基于多变量 GERT 的复杂装备研制进度控制方法及应用[J]. 控制与决策, 2025, 40(3): 963-972.
(Liu Y, Zhang J Y, Wang Z C, et al. Schedule control method and application for complex equipment development based on multivariate GERT[J]. Control and Decision, 2025, 40(3): 963-972.)
- [39] Hermann Haken. 协同学导论[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 1988.
(Haken H. An introduction to synergetics[M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 1988.)
- [40] 姚华, 黄金泉. 航空发动机燃油及控制系统设计[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
(Yao H, Huang J Q. Design of fuel and control systems for aeroengines[M]. Beijing: Science Press, 2022.)
- [41] 贾超, 柴小亮, 吴有训. 基于关键参数重构的航空发动机可靠性提高[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(23): 10051-10056.
(Jia C, Chai X L, Wu Y X. Reliability improvement of aero engine based on key parameter reconstruction[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(23): 10051-10056.)
- [42] 黄劲东. 航空发动机试验验证体系建设[J]. 航空动力, 2021(3): 57-63.
(Huang J D. Construction of aero engine testing system for verification and validation[J]. Aviation Power, 2021(3): 57-63.)
- [43] 朱俊强, 徐纲, 卢新根, 等. 航空发动机高空性能分析与试验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2022.
(Zhu J Q, Xu G, Lu X G, et al. Analysis and testing of high-altitude performance for aeroengines[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2022.)
- [44] 陈虎, 江世琳, 汤洪涛, 等. 国产高端装备在航空发动机制造领域应用现状和发展趋势[J]. 中国科学院院刊, 2025, 40(5): 888-895.
(Chen H, Jiang S L, Tang H T, et al. Current status and development trends of domestic high-end equipment in aero-engine manufacturing[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2025, 40(5): 888-895.)
- [45] 张小伟. 金属增材制造技术在航空发动机领域的应用[J]. 航空动力学报, 2016, 31(1): 10-16.
(Zhang X W. Application of metal additive manufacturing in aero-engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(1): 10-16.)
- [46] Han P L. Additive design and manufacturing of jet engine components[J]. Engineering, 2017, 3(5): 163-172.
- [47] 韩霞, 韩学影. 科技创新驱动航空制造业发展的路径及政策研究[J]. 中国科技论坛, 2025(3): 77-85.
(Han X, Han X Y. Research on path and policy of scientific and technological innovation driving the development of aviation manufacturing industry[J]. China Science and Technology Forum, 2025(3): 77-85.)
- [48] 赵璐, 陆瑾. 企业主导下的产学研政协同创新模式研究——以商用航空发动机领域的联合创新计划为例[J]. 华东科技, 2023(1): 88-92.
(Zhao L, Lu J. Research on enterprise-led industry-university-research-government collaborative innovation models: Taking the joint innovation program in the commercial aeroengine field as an example[J]. East China Science & Technology, 2023(1): 88-92.)

作者简介

陈俊清 (1993-), 男, 博士生, 主要研究方向为能力评价及提升、工程管理、决策优化, E-mail: 1270420762@qq.com;

武博祎 (1963-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为科技政策、科技管理、技术经济, E-mail: wby@ciecc.com.cn;

王奕博 (1994-), 男, 助理研究员, 博士后, 主要研究方向为项目管理、路径优化, E-mail: yibowong@qq.com;

吕一涵 (1994-), 女, 助理研究员, 硕士生, 主要研究方向为工程管理、产业经济、国际关系, E-mail: yihanlyu2501@gmail.com.