

基于能量 - 气动耦合的旋翼无人机运输能力量化模型与验证

孙明杰^{1,2}, 李宏伟¹, 刘悦宝¹

¹陆军工程大学研究生院, 江苏 南京

²32046部队保障部, 江苏 南京

收稿日期: 2025年5月24日; 录用日期: 2025年6月16日; 发布日期: 2025年6月24日

摘要

本文提出以“运输量($D = ML$)”作为旋翼无人机运输能力的综合量化指标, 结合能量守恒与空气动力学原理, 构建基于通用参数的运输量计算模型。通过分析无人机功率分配、螺旋桨尺寸、载重量、风阻等参数的耦合关系, 推导出运输量的量化公式, 并揭示载重量与运输距离的动态平衡机制。研究发现, 运输量与无人机携带能量、螺旋桨尺寸正相关, 与自重、迎风面积负相关; 载重增加时运输距离非线性下降, 且存在最高效载重量($M_{\text{最效}}$)使运输量最大化。通过验证, 模型计算结果与实际数据一致, 表明该模型可为无人机选型与设计优化提供理论支持。

关键词

旋翼无人机, 运输量, 量化模型, 能量守恒, 空气动力学

Quantitative Modeling and Validation of Rotorcraft UAV Transport Capacity Based on Energy-Aerodynamic Coupling

Mingjie Sun^{1,2}, Hongwei Li¹, Yuebao Liu¹

¹Graduate School, Army Engineering University of PLA, Nanjing Jiangsu

²Logistics Department, Unit 32046 of PLA, Nanjing Jiangsu

Received: May 24th, 2025; accepted: Jun. 16th, 2025; published: Jun. 24th, 2025

Abstract

This study proposes “Transport Metric ($D = ML$)” as a comprehensive quantitative indicator for

文章引用: 孙明杰, 李宏伟, 刘悦宝. 基于能量-气动耦合的旋翼无人机运输能力量化模型与验证[J]. 建模与仿真, 2025, 14(6): 225-232. DOI: 10.12677/mos.2025.146492

evaluating the transport capacity of rotorcraft UAVs. By integrating the principles of energy conservation and aerodynamics, we developed a generalized parameter-based computational model to quantify transport capacity. Through an analysis of the coupling relationships among parameters such as UAV power allocation, propeller size, payload mass, and aerodynamic drag, we derived a quantitative formula for the transport metric and revealed a dynamic equilibrium mechanism between payload and transport distance. Key findings include: Positive correlations between transport metric and UAV energy reserves or propeller size; Negative correlations with UAV self-weight and frontal wind-facing area; A nonlinear decline in transport distance with increased payload, identifying an optimal payload mass (M_{opt}) that maximizes transport metric. Validation experiments confirmed the model's consistency with empirical data, demonstrating its utility in UAV selection and design optimization.

Keywords

Rotorcraft UAV, Transport Metric, Quantitative Model, Energy Conservation, Aerodynamics

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

旋翼无人机机动灵活、操作方便,正在被广泛运用到运输领域,解决“最后一公里”投送难题[1]。我国有成熟的无人机产业链,各类运输无人机技术日趋完善,为运输应用提供了丰富选项。但是,面对不同厂家、不同参数的大量可用机型,如何通过出厂参数准确测算运输能力,从而科学进行择优排序,可靠遂行运输任务,成为用户单位面临的一大难题。

当前,对旋翼无人机运输效能的研究还处在初步阶段。国外方面,Kamran Turkoglu 等人提出一种具有 VTOL 能力的亚音速运输无人机的概念研究和原型设计,对大型四旋翼无人机运输效能作了模拟分析[2]。Donkyu Baek 等人提出了一种无人机运输任务规划算法,能够使同样能耗下无人机完成运输任务最大化[3]。Campbell James F.等人以快递无人机为对象,提出一种解析不同类型无人机能耗与性能相互关系的模型[4]。国内方面,袁子怡等人使用模糊层次分析法对无人机运输效能进行评估,并尝试使用三解模糊数降低主观因素影响[5]。崔栋等人提出一种基于超效率平行网络数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)的民用无人机岛礁运输效能评估方法,相较经典 CCR 模型和平行网络 DEA 模型能使评估结果区分度更加明显[6]。张勇等人结合无人运输机任务和使用特点构建指标体系,使用模糊层次分析法对运输无人机效能进行评估[7]。

上述研究主要聚焦外部环境、任务因素、电池对旋翼无人机运输效能的制约与影响,属于间接性、反馈性的计算方法,直观性和可解释性还不够强。本文从旋翼无人机空气动力学物理原理出发,利用可查询、可测量的机械参数直接求解无人机运输能力,能够直观反映不同参数、机械规格对运输能力的影响,在运输无人机型开发、选型方面更有可参考性。

2. 对无人机运输能力的解析

运输能力通常指在一定时期内,运用各种运输工具和手段,将人员、装备、物资等从一个地点运送到另一个地点的能力,概括的讲,就是把“特定数量”的物资运送到“特定距离”的能力。

概括上述定义,可认为“运载数量 M ”和“运输距离 L ”这两项指标是表征无人机运输能力强弱的基

本指标,不妨设两者的乘积为“运输量 D ”,其单位为“千克米”(kg·m)或“吨千米”(t·km),作为衡量不同机型运输能力大小的主要指标。即:

$$D = M \cdot L \quad (1)$$

无人机出厂标定的动力参数通常包括最大载重量 $M_{\max}$ 、最大航程 $L_{\max}$ 、续航时间 t 、功率 P 、电池容量等参数,对同一无人机来说,通常载重量与运输距离是大致成反比的($M \propto L^{-1}$),即载重加大则可运输距离变小、反之载重减小则可运输距离增大;而由于无人机自身重量也占用载重能力,且发动机、电动机在不同载重下能量转化效率不同,因此载重量与运输不严格正反比。因此,厂家标定的最大载重量 $M_{\max}$ 、最大航程 $L_{\max}$ 是不计其他条件的各自极限值,只能用作取值范围,不能直接用来计算运输量[8]-[10]。

3. 运输量计算公式推导

根据空气动力学,无人机运输的过程就是为货物加装一个能推动空气的装置,通过向下、向后推动空气,实现货物升高后横向移动到目标点,消耗总做功量等于螺旋桨反向推进空气做功量之和。

设旋翼无人机输出功率为 P ,单位为瓦(W);自重为 M_0 ,单位为千克(kg);负载货物质量为 M ,单位为千克(kg);运输距离为 L ,单位为米(m)。根据能量守恒定律,无人机输出功率 P 被用来推动向上、向前做功,可分解为升力功率 $P_{\text{升力}}$ 与推进功率 $P_{\text{推进}}$ 之和[11]-[16],即:

$$P = P_{\text{升力}} + P_{\text{推进}} = \frac{(M + M_0) \cdot g \cdot v_{\text{反推空气}}}{\eta_{\text{系统}}} + \frac{F_{\text{平均风阻}} \cdot v_{\text{无人机}}}{\eta_{\text{推进}}} \quad (2)$$

式中, $v_{\text{反推空气}}$ 为旋翼反推空气流出的速度,单位为米每秒(m/s); $v_{\text{无人机}}$ 为无人机飞行速度,单位为米每秒(m/s); $\eta_{\text{系统}}$ 为系统效率、 $\eta_{\text{推进}}$ 为推进效率(输出功率的转化效率,通常设 0.6~0.8 之间); $F_{\text{平均风阻}}$ 为无人机横向运输平均空气阻力,根据空气动力学,有:

$$v_{\text{反推空气}} = \sqrt{\frac{2(M + M_0) \cdot g}{\rho_{\text{空气密度}} \cdot \pi R_{\text{螺旋桨}}^2}} = K_1 \cdot \sqrt{M + M_0} \quad (3)$$

$$F_{\text{平均风阻}} = \frac{1}{2} \rho_{\text{空气密度}} \cdot v_{\text{无人机}}^2 \cdot A_{\text{迎风面积}} \cdot C_d = K_2 \cdot v_{\text{无人机}}^2 \quad (4)$$

上式中, C_d 为空气风阻系数, $R_{\text{螺旋桨}}$ 为螺旋桨直径,单位为米(m); $A_{\text{迎风面积}}$ 为无人机携货物飞行的迎风面积,单位为平方米(m²); K_1 、 K_2 为简化计算所取的综合系数[17][18], 综上可得:

$$P = K_1 \cdot \frac{(M + M_0)^{\frac{3}{2}}}{\eta_{\text{系统}}} + K_2 \cdot \frac{v_{\text{无人机}}^3}{\eta_{\text{推进}}} \quad (5)$$

将式(6)变形,可得:

$$v_{\text{无人机}}^3 = \left[P - K_1 \cdot \frac{(M + M_0)^{\frac{3}{2}}}{\eta_{\text{系统}}} \right] \cdot \frac{\eta_{\text{推进}}}{K_2} \quad (6)$$

又因为:

$$W = P \cdot t \quad (7)$$

上式中, W 是无人机携带能量总数, P 是无人机输出功率, t 是完成任务飞行时间,无人机可携带能量总数 W 是固定的,假设无人机在任务飞行中的功率 P 是恒定的(货物质量不发生变化且匀速飞行),则有:

$$L = v_{\text{无人机}} \cdot t = \sqrt[3]{\left[P - K_1 \cdot \frac{(M + M_0)^2}{\eta_{\text{系统}}} \right] \cdot \frac{\eta_{\text{推进}}}{K_2} \cdot \frac{W}{P}} \quad (8)$$

由此可得, 无人机运输量的函数式为:

$$D(m) = ML = \frac{WM}{P} \cdot \sqrt[3]{\left[P - K_1 \cdot \frac{(M + M_0)^2}{\eta_{\text{系统}}} \right] \cdot \frac{\eta_{\text{推进}}}{K_2}} \quad (9)$$

其中:
$$\begin{cases} K_1 = \sqrt{\frac{2g}{\rho_{\text{空气密度}} \cdot \pi R_{\text{螺旋桨}}^2}} \\ K_2 = \frac{1}{2} \rho_{\text{空气密度}} \cdot A_{\text{迎风面积}} \cdot C_d \end{cases}$$

上述公式是对旋翼无人机简单模型的近似计算, 主要用来反应不同参数、变量之间的函数关系, 揭示无人机运输量主要取决于哪些因素; 实践当中对不同结构类型的无人机(如四旋翼、六旋翼)在空气动力学方面有所不同, 还需加入其它修正系数。

4. 变量分析

式(9)为无人机电重量计算公式, 展示了载重量 M 与对应可达成运输量 D 的函数关系。通过公式, 可以较直观地分析无人机各参数之间, 以及各参数与运输量的关系。

4.1. 运输量与动力参数、载重量的关系

从式(9)可得, 无人机运输量 D 与所携带能量总数 W 、系统效率 $1/\eta_{\text{系统}}$ 、螺旋桨尺寸 R 正相关, 这 3 个参数增大时运输量相应增大; 与无人机自重 M_0 、迎风面积 A 负相关, 这两个参数变小时运输量相应增大; 与功率 P 、载货量 M 关系较复杂, 存在最优区间。因此:

推论 1: 无人机携带能量越多, 运输量越大; 同等能量下, 提高机械效率、增大螺旋桨尺寸、轻量化机身、改进风阻设计等措施可提高无人机运输量。

从式(2)来看, 无人机功率 P 可分解为升力功率 $P_{\text{升力}}$ 与推进功率 $P_{\text{推进}}$ 之和, 若取 $P_{\text{推进}}$ 为 0, 将 P 全部用来提供升力, 此时求得的 M 值为无人机最大载重量。联立(2), (3)得:

$$M_{\max} = \left(\frac{P \cdot \eta_{\text{系统}}}{K_1} \right)^{\frac{2}{3}} - M_0 \quad (10)$$

式中, $M_{\max}$ 为无人机最大可负载重量。由上式可得, 无人机负载能力 M 与功率 P 、螺旋桨尺寸 R 正相关, 且总负载 $(M + M_0)$ 的 1.5 次幂与功率 P 、螺旋桨直径 R 均成正比, 即: $(M + M_0) \propto P^{2/3}$, $(M + M_0) \propto R_{\text{螺旋桨}}^{2/3}$ 因此:

推论 2: 提高功率、增大螺旋桨尺寸均可提高无人机电重量。

4.2. 载重量与飞行速度、运输距离关系

式(5)变形可得 $v_{\text{无人机}} \propto (P - P_{\text{升力功率}})^{1/3}$, 体现了升力与推进功率的竞争关系。当载重 M 增大时, 升力功率占比增加, 导致可用于推进的功率减少, 飞行速度下降。

式(6)展示了无人机飞行速度与载重量的关系, 显然, 载重量 M 与无人机飞行速度 $v_{\text{无人机}}$ 的 2 次幂概略成线性负相关, 即 $(M + M_0) \propto v_{\text{无人机}}^2$ 。

式(8)展示了无人机载重量 M 与运输距离的关系, 显然, 运输距离 L 与载重量的 2 次方根 $(M + M_0)^{1/2}$ 线性负相关, 即 $L \propto 1/(M + M_0)^{1/2}$, 因此:

推论 3: 无人机运输速度、运输距离与载重量负相关, 且运输速度对载重量变化相对不敏感, 载重每增加 10%, 无人机速度和运输距离分别下降约 3%~5% (具体依赖气动参数)。

4.3. 最高效率载重量及相关因素分析

若以 M 、 $v_{\text{无人机}}$ 为自变量, 对式(5)求偏导 $\partial P/\partial M$ 、 $\partial P/\partial v$, 并求导数等于 0 时的极值, 可得方程:

$$\frac{K_1 M_{\text{最效}} (M_{\text{最效}} + M_0)^{\frac{1}{2}}}{2\eta_{\text{系统}}} = \frac{K_2 v_{\text{无人机}}^3}{\eta_{\text{推进}}}$$

再将式(6)与式(10)联立, 消去 $v_{\text{无人机}}^3$, 可得:

$$P = \frac{K_1 (M_{\text{最效}} + M_0)^{\frac{3}{2}}}{\eta_{\text{系统}}} \left(1 + \frac{M_{\text{最效}}}{\sqrt{M_{\text{最效}} + M_0}} \cdot \frac{K_2}{\eta_{\text{推进}}} \right)$$

式中, $M_{\text{最效}}$ 为最高效载重量。从上式可得, 在无人机功率 P 确定的情况下, 无人机载重量为 $M_{\text{最效}}$ 概略与无人机迎风面的尺寸(系数 K_2 中的子系数 $A_{\text{迎风面积}}$)成反比, 即 $M_{\text{最效}} \propto 1/A_{\text{迎风面积}}^{1/2}$; 与螺旋桨直径(系数 K_1 中的子系数 $R_{\text{螺旋桨}}$)成正比, 即 $M_{\text{最效}} \propto R_{\text{螺旋桨}}$, 因此:

推论 4: 无人机最高效载重量由无人机功率、系统效率、自身重量、迎风面积、螺旋桨等参数相关; 在确定功率下, 无人机尺寸越小(迎风面积越小), 螺旋桨直径越大, 最高效载重量越大。

5. 算例验证

选取现有无人机典型参数值, 对式(9)“无人机运输量计算公式”和式(12)“最高效载重量计算公式”进行验证。

设旋翼无人机 A 在 Z 地执行运输任务, 无人机及环境参数见表 1:

Table 1. UAV and environmental parameters

表 1. 无人机及环境参数

参数名称	功率	自重	系统效率	推进效率	螺旋桨半径	迎风面积	满功率飞行时间	空气密度	风阻系数
符号	P	M_0	$\eta_{\text{系统}}$	$\eta_{\text{推进}}$	R	A	t	ρ	C_d
数值	1000	2	0.7	0.65	0.15	0.1	3600	1.225	0.3
单位	W	kg	—	—	m	m ²	s	kg/m ³	h

5.1. 系数计算

升力系数:

$$K_1 = \sqrt{\frac{2g}{\rho \cdot \pi R^2}} = \sqrt{\frac{2 \times 9.81}{1.225 \times \pi \times 0.15^2}} \approx 6.24$$

风阻系数:

$$K_2 = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot C_d = 0.5 \times 1.225 \times 0.1 \times 0.3 \approx 0.0184$$

5.2. 运输量公式计算验证

M 值取从 1 到 5 的自然数, 依次代入下式分别求解运输距离 L 和运输量 D :

$$L = v_{\text{无人机}} \cdot t = \sqrt[3]{\left[P - K_1 \cdot \frac{(M + M_0)^{\frac{3}{2}}}{\eta_{\text{系统}}} \right] \cdot \frac{\eta_{\text{推进}}}{K_2} \cdot \frac{W}{P}}$$

$$D(m) = ML = \frac{WM}{P} \cdot \sqrt[3]{\left[P - K_1 \cdot \frac{(M + M_0)^{\frac{3}{2}}}{\eta_{\text{系统}}} \right] \cdot \frac{\eta_{\text{推进}}}{K_2}}$$

计算结果见表 2:

Table 2. Simulation and Computational Results of Transport Metric

表 2. 运输量模拟计算结果

载重量(kg)	运输距离(km)	速度(m/s)	运输量(kg·m)
1	12.3	28.1	12.3
2	10.1	26.4	20.2
3	8.2	24.2	24.6
4	6.5	21.5	26
5	4.9	18	24.5

对计算结果进行图形分析, 见图 1:

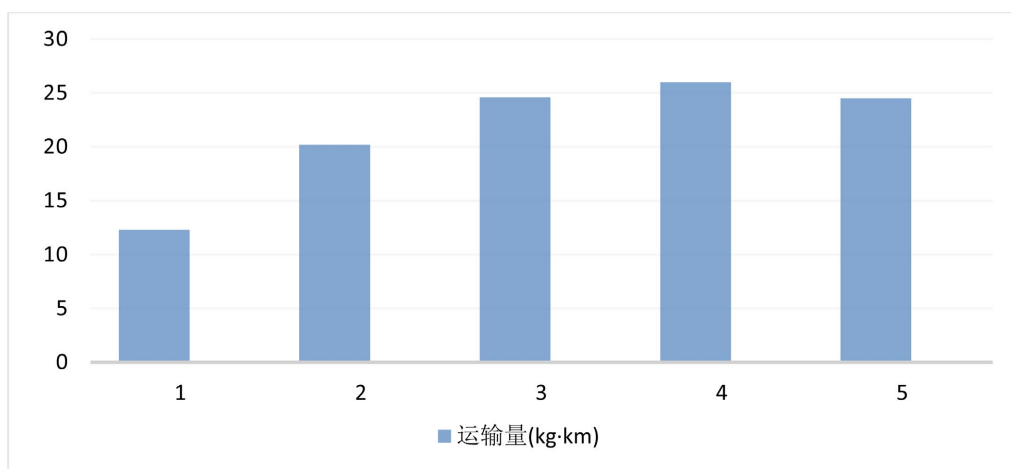


Figure 1. Graphical analysis of transport metric simulation results

图 1. 运输量模拟计算结果图形分析

从计算结果看:

1. 自重 2 kg 无人机可携带 1 kg 货物飞行 12 km 左右, 与市场上相应参数无人机性能一致, 表明该公式计算结果与实际值大体一致, 验证了公式有效性;

2. 功率确定情况下, 随着载重量增加, 运输距离、飞行速度对应下降, 但下降幅度较小, 与推论 3 一致;

3. 运输量不同, 同时, 在载重量 M 取 4 kg 时, 运输量取得了最大值 26,000 kg·m, 验证了存在最高效载重量。

5.3. 最高效载重量公式计算验证

将相关参数代入式(12):

$$P = \frac{K_1 (M_{\text{最效}} + M_0)^{\frac{3}{2}}}{\eta_{\text{系统}}} \left(1 + \frac{M_{\text{最效}}}{\sqrt{M_{\text{最效}} + M_0}} \cdot \frac{K_2}{\eta_{\text{推进}}} \right)$$

利用代入逼近法求解近似值, 可得 $M_{\text{最效}} \approx 3.86 \text{ kg}$ 。在上面式(9)的验证计算中, M 以自然数为取值范围, 当取 4 kg 时对应运输量最大, 与此处计算结果相一致, 验证了公式的有效性。

6. 结论

本研究提出一种利用市面上无人机参数和可查询、可测量数据近似计算旋翼无人机运输量的数据模型, 可用于量化评估不同参数旋翼无人机运输能力及运输效能评估。区别于传统的采集任务数据、人的使用反馈等建模方法, 减少了主观因素影响, 结果更精确、计算更简便。通过模拟通用旋翼无人机在不同运输负载下的运输量, 可得到以下结论:

- (1) 提高机械效率、增大螺旋桨尺寸、轻量化机身、改进风阻设计等措施可提高无人机运输量。
- (2) 旋翼无人机运输速度对载重量变化相对不敏感, 载重每增加 10%, 无人机速度和运输距离分别下降约 3%~5% (具体依赖气动参数)。
- (3) 在确定功率下, 无人机尺寸越小(迎风面积越小), 螺旋桨直径越大, 最高效载重量越大。

本文的工作有待进一步的完善与发展, 在建模方面, 一是对假设无人机功率、能量数是恒定的, 实际上无人机功率在上升、降落等环节无人机功率是变化的, 电池、燃料在不同使用强度下转化率也是可变的, 可能导致理论计算值与实践数值有一定出入; 二是本研究对个别环境参数, 如多旋翼无人机不同螺旋桨之间的空气扰动影响作了简化或忽略, 可能导致少数特定构型的多旋翼机型计算结果不够准确, 下步还需深化研究。

基金项目

2024 年军队某重大理论与现实问题研究项目。

参考文献

- [1] 吕游, 侯远达. 运输无人机军事运用研究[J]. 军事交通学院学报, 2020, 22(3): 5-8.
- [2] Najafi, S. and Turkoglu, K. (2015) Conceptual Study and Prototype Design of a Subsonic Transport UAV with VTOL Capabilities. *53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting*, **17**, 14329-14343.
- [3] Baek, D., Chen, Y., Bocca, A., et al. (2018) Battery-Aware Energy Model of Drone Delivery Tasks. *ISLPED'18: Proceedings of the International Symposium on Low Power Electronics and Design*, Seattle, 23-25 July 2018, 1-6.
- [4] Zhang, J., Campbell, J.F., Sweeney II, D.C. and Hupman, A.C. (2021) Energy Consumption Models for Delivery Drones: A Comparison and Assessment. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **90**, Article ID: 102668. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102668>
- [5] 崔栋, 李宏伟, 陆鸣, 等. 基于超效率平行网络 DEA 的民用无人机岛礁运输效能评估方法研究[J]. 医疗卫生装备, 2023, 44(1): 35-41.
- [6] 孙勇, 张乐, 胡洁. 基于模糊层次分析法的无人运输机效能评估[J]. 军事交通学报, 2022(11): 91-94.
- [7] 赵志忠, 刘艳, 高正红. 军用运输机运力评估模型及影响因素研究[J]. 航空工程进展, 2010, 1(1): 25-29.
- [8] 沈雳, 于琦, 刘国强. 基于试飞的运输直升机任务效能分析及优化[J]. 航空科学技术, 2017, 28(5): 47-52.

-
- [9] 赵敬超, 沈雳. 直升机运输效能试飞技术研究[J]. 航空科学技术, 2015, 26(5): 67-70.
- [10] 刘昌昊, 曹义华, 梅晓萌, 等. 高速直升机运输效能评估[J]. 航空学报, 2024, 45(9): 311-322.
- [11] Brigantic, R.T. and Merrill, D. (2004) The Algebra of Airlift. *Mathematical and Computer Modelling*, **39**, 649-656. [https://doi.org/10.1016/S0895-7177\(04\)90546-8](https://doi.org/10.1016/S0895-7177(04)90546-8)
- [12] 王适存, 徐国华. 直升机旋翼空气动力学的发展[J]. 南京航空航天大学学报, 2001(3): 203-211.
- [13] 陈仁良, 李攀, 吴伟, 等. 直升机飞行动力学数学建模问题[J]. 航空学报, 2017, 38(7): 6-22.
- [14] 王治平, 吉洪蕾, 康清宇, 等. 集成多旋翼气动干扰的 UAM 飞行动力学模型[J/OL]. 航空学报: 1-13. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20250220.1646.002.html>, 2025-06-17.
- [15] 张雅铭. 直升机需用功率计算方法研究[J]. 直升机技术, 2003(1): 1-5.
- [16] 向朝兴, 茅健. 四旋翼无人机的旋翼空气动力学建模与仿真[J]. 计算机仿真, 2021, 38(10): 48-52.
- [17] 李亮明. 基于参考重量的直升机航程性能试飞研究[J]. 工程与试验, 2019, 59(4): 33-34, 37.
- [18] 包明敏, 苏兵兵, 吴令华, 等. 新构型高速旋翼飞行器的现状和发展趋势[J]. 飞行力学, 2019, 37(3): 1-8.