

文章编号: 1000-8055(2026)11-20250271-10

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20250271

任务场景驱动的倾转旋翼桨叶气动 优化设计方法

邓琳丹^{1,2}, 宋文萍^{1,2}, 许建华^{1,2}, 韩忠华^{1,2}, 何成军³

(1. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072;

2. 飞行器基础布局全国重点实验室, 西安 710072;

3. 中国空气动力研究与发展中心 空天技术研究所, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 针对倾转旋翼机桨叶在悬停状态和巡航状态下的最优外形存在强矛盾这一难题, 在倾转旋翼桨叶的优化设计中综合考虑不同任务场景下的总能耗, 发展了任务场景驱动的倾转旋翼桨叶气动优化设计方法, 确保飞行性能与效率的全面提升。考虑垂直起飞、巡航、悬停等典型阶段及其工作时长, 以整个任务场景所消耗的总能量为目标, 将多点多目标问题转化为单目标问题, 分别分析了侧重于巡航和悬停任务场景下优化桨叶的外形差距, 结果表明: 发展的方法可实现倾转旋翼桨叶在多工况下都具有较高的气动性能, 优化时间相比多目标优化节省 69.67%。

关 键 词: 倾转旋翼; 多目标优化; 气动优化; 任务场景驱动; 代理模型

中图分类号: V211.3

文献标志码: A

Mission-driven aerodynamic optimization method for tiltrotor blades

Deng Lindan^{1,2}, Song Wenping^{1,2}, Xu Jianhua^{1,2}, Han Zhonghua^{1,2}, He Chengjun³

(1. School of Aeronautic, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. National Key Laboratory of Aircraft Configuration Design, Xi'an 710072, China;

3. Institute of Space Technology,

China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: To address the significant contradiction between the optimal blade shapes of tiltrotor aircraft in hover and cruise modes, a mission scenario-driven aerodynamic optimization design method for tiltrotor blades was developed. This approach comprehensively considered the total energy consumption across different mission scenarios to ensure overall improvements in flight performance and efficiency. By incorporating typical mission phases including vertical takeoff, cruise, and hover and their respective durations, the method transformed the multi-point multi-objective optimization problem into a single-objective optimization problem with the total energy consumption of the entire mission scenario as the objective. The shape differences of the optimized blades under cruise and hover-focused mission scenarios were analyzed. Results indicated that the developed method achieved high aerodynamic performance of tiltrotor blades across multiple operating conditions, with optimization time reduced by 69.67% compared with multi-objective optimization.

收稿日期: 2025-06-05

作者简介: 邓琳丹(2000—), 女, 博士生, 研究方向为螺旋桨气动设计。E-mail: denglindan@nwpu.edu.cn

通信作者: 许建华(1984—), 男, 副研究员, 博士, 研究方向为螺旋桨气动设计。E-mail: xujh@nwpu.edu.cn

引用格式: 邓琳丹, 宋文萍, 许建华, 等. 任务场景驱动的倾转旋翼桨叶气动优化设计方法[J]. 航空动力学报, 2026, 41(11): 20250271. Deng Lindan, Song Wenping, Xu Jianhua, et al. Mission-driven aerodynamic optimization method for tiltrotor blades[J]. Journal of Aerospace Power, 2026, 41(11): 20250271.

Keywords: tiltrotor; multi-objective optimization; aerodynamic optimization; mission-driven; surrogate model

倾转旋翼机通过旋翼转轴的倾转实现悬停、前飞等多个飞行模式,实现高速巡航和垂直起降,其独特的设计和优越的性能在军民领域备受关注^[1]。目前,美国已发展到第三代倾转旋翼机 V-280,并启动了 SPRINT(speed and runway independent technologies)项目,其中贝尔公司提出的 HS-VTOL(high-speed vertical takeoff and landing)概念以旋翼桨叶可折叠设计为突破点,为进一步提升速度、稳定性和适用性提供了新的方向^[2]。旋翼作为倾转旋翼机的核心部件面临多个关键技术难点,悬停与巡航阶段效率难以兼顾便是其中之一。在悬停与垂直起降飞行状态中,旋翼拉力需要平衡全机重力,并克服机翼对旋翼下洗流的阻塞引起的额外载荷,因此悬停效率成为旋翼设计的核心目标之一;而在巡航状态下,旋翼拉力仅需克服前飞阻力,此时更强调推进效率。两种性能需求的矛盾给桨叶外形设计带来了困难,倾转旋翼桨叶需要进行大展弦比/小扭转旋翼和小展弦比/大扭转螺旋桨之间的折中外形设计^[3]。

针对上述难题,Le Pape 等^[4]采用耦合 CFD 方法与梯度优化策略,只针对悬停效率对倾转旋翼平面外形进行了优化设计。然而倾转旋翼机的气动设计本质上是一个多目标多约束的问题,仅针对某一单独状态,没有综合考虑倾转旋翼机多状态下的设计要求,很难获得气动性能最优的旋翼外形参数。李鹏^[5]基于动量叶素理论和高精度 CFD 方法开展了倾转旋翼气动布局的综合优化设计;Jimenez-Garcia 等^[6]采用 CFD 方法和梯度优化方法寻求兼顾悬停和巡航性能的桨叶外形,利用离散伴随法降低计算成本;黄胤强等^[7]采用 NSGA-II(nondominated sorting genetic algorithm-II)和动量叶素理论开展多目标优化设计;王宗辉等^[8]结合动量叶素理论和 NSGA-II,将倾转旋翼的悬停效率和推进效率分别提升至 75.34% 和 71.32%,重点优化了桨叶翼型分布、弦长和扭转角等关键参数。然而,多目标进化算法通常需要评估大量的样本点来保证全局寻优,计算规模较大。

为了控制计算规模,通常引入代理模型来替代原始分析模型,代理模型在保证较高计算精度的同时计算量比原始模型小得多,可以大大提高优化效率。Stanley^[9]开展了倾转旋翼机旋翼的气

动、动力学多学科优化设计,采用了遗传算法及神经网络等智能优化方法,并将协同优化方法和近似技术用于优化设计中;朱秋娟^[10]采用耦合非定常动量源模型的 CFD 方法,基于置换遗传算法的拉丁超立方方法和径向基函数的代理模型优化方法,构建了适用于倾转旋翼机气动性能优化的设计框架。Leusink 等^[11]采用基于代理模型的遗传算法实现了多目标优化,通过优化旋翼桨叶的扭转角和弦长分布,进一步提高悬停性能和巡航性能。

考虑到倾转旋翼机是具有多飞行工况的飞行器,需综合考虑任务场景下的总能耗(即旋翼完成单次任务所需消耗的能量),单一工况的优化可能导致在其他工况下表现不佳,从而增加总体能量消耗,且不同的任务场景的侧重不同,仅关注各工况下的性能无法快速找到最低能耗的桨叶外形。针对倾转旋翼机桨叶在悬停状态和巡航状态下的最优外形存在强矛盾且点多目标优化耗时长的难题,本文综合考虑不同任务场景下的总能耗,提出了任务场景驱动的倾转旋翼桨叶气动优化设计方法,确保飞行性能与优化效率得到全面的提升。

1 桨叶气动分析方法

本文在优化设计过程中采用的桨叶气动分析方法为基于动量叶素理论的工程算法 QPROP^[12],获得优化外形后,采用计算精度更高但较为耗时的雷诺平均 Navier-Stokes(RANS)方法进行螺旋桨气动分析。

1.1 流动控制方程及其求解

本文采用课题组自主开发的 RANS 求解程序 ROTNS^[13]获得旋翼/螺旋桨气动性能。该程序主要用于分析轴流状态下的旋翼/螺旋桨气动性能。将绝对坐标下的控制方程转换为旋转坐标系下的控制方程:

该 RANS 求解器的时间推进采用隐式 LU-SGS(lower-upper symmetric-Gauss-Seidel)格式^[14],空间离散格式为 Jameson 中心格式^[15]。湍流模型采用 S-A(Spalart-Allmaras)^[16]。为方便捕捉桨尖尾涡和实施旋转周期性边界条件,采用嵌套网格系统^[17],包括 H-H 型背景网格和 C-H 型桨叶网格。同时采用多重网格技术^[18],在不同粗细网格上消

除不同频率误差, 从而加速解的收敛。

1.2 倾转旋翼桨叶气动特性参数

由于旋翼和螺旋桨在力系数上的定义不同, 悬停状态下的气动特性参数参考旋翼的拉力系数 C_T 、功率系数 C_P 、悬停效率 FM 定义^[19]; 巡航状态下的气动特性参数参考螺旋桨的前进比 λ 、实度 σ 、拉力系数 C_T 、功率系数 C_P 和推进效率 η 定义^[20]。

1.3 算例验证

1.3.1 轴流状态(巡航状态)

以剖面翼型为 E387 的某桨径为 6 inch (1 inch=2.54 cm) 的 2 叶螺旋桨 (75% 桨叶半径剖面的扭转角为 15°) 为例^[21], 进行桨叶气动分析方法和程序的正确性验证。计算状态如下: 高度为 0 km, 速度为 0~20 m/s, 转速为 6 000 r/min, ROTNS 的计算网格中背景网格量为 178 万 ($100 \times 148 \times 120$), 桨叶网格量为 90 万 ($224 \times 48 \times 84$)。如图 1 所示, ROTNS 和 QPROP 的计算值与试验值均吻合良好, 证明它们均有较高的可信度。

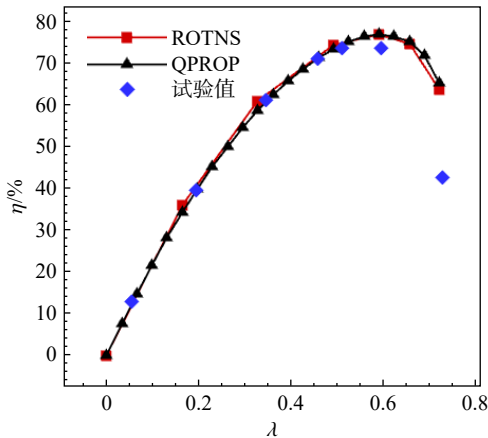


图 1 巡航状态 ROTNS 和 QPROP 的计算值与试验值^[21]对比

Fig. 1 Comparison of ROTNS and QPROP computational results with experimental data^[21] in cruise mode

1.3.2 悬停状态

以剖面翼型为 NACA0012 的旋翼为例^[22], 进行桨叶气动分析方法和程序在悬停状态的正确性验证。分别采用 ROTNS 和 QPROP 计算了桨尖马赫数 $Ma_{tip}=0.45$ 状态下不同拉力系数的悬停效率, 如图 2 所示。结果表明, 采用 ROTNS 的计算结果与试验值更接近, QPROP 的计算结果明显比试验值高, 但总体趋势一致。考虑到本文旨在验证提出的任务场景驱动方法的有效性, 为减少工作量, 在优化过程中采用 QPROP 计算桨叶气动特性, 优化结果评估由更高精度的 ROTNS 完成。

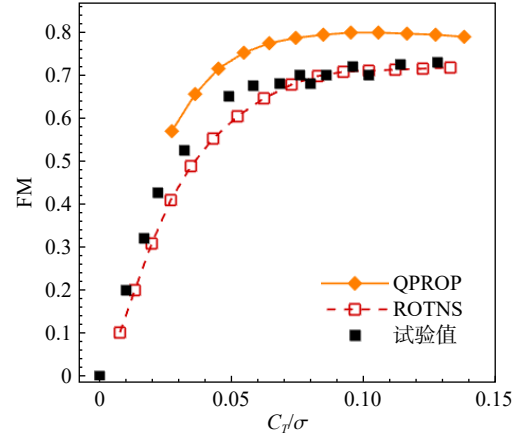


图 2 悬停状态 QPROP 和 ROTNS 的计算值与试验值^[22]对比

Fig. 2 Comparison of QPROP and ROTNS computational results with experimental data^[22] in hover modes

2 倾转旋翼桨叶优化设计

桨叶优化设计采用课题组自主开发的高效全局气动优化设计软件 SurroOpt^[23], 代理模型采用的是 Kriging 模型^[24-25]。该程序可采用 expected improvement (EI)^[26]、minimizing surrogate prediction (MSP)^[27] 等加点准则, 保证代理模型在最优点的精度。

本文倾转旋翼桨叶的设计要求如下: 桨叶数为 3, 半径为 2.9 m, 悬停状态下高度为 0 km, 来流速度为 0 m/s, 转速范围为 730~770 r/min, 拉力 $T_{\text{hover}} \geq 20\,600$ N; 巡航状态下高度为 0.1 km, 来流速度为 88.9 m/s, 转速范围为 400~450 r/min, 拉力 $T_{\text{cruise}} \geq 1\,800$ N。

2.1 倾转旋翼桨叶多点多目标气动优化设计

首先采用了基于代理模型的多目标优化算法 (surrogate-based multi objective optimization algorithm, SBMO)^[28] 开展倾转旋翼桨叶的多点多目标气动优化设计。本文倾转旋翼桨叶多目标优化的流程如图 3 所示。其中变距桨叶子优化指的是在优化过程中, 桨叶外形确定后, 在满足规定的转速范围时, 通过调整桨距角分别满足悬停状态和巡航状态下的拉力需求, 达到轴功率最低。

将悬停和巡航时需要的桨叶轴功率最低作为优化目标, 同时约束悬停状态和巡航状态条件下的拉力, 优化问题的数学模型如下:

$$\begin{aligned} & \min P_{\text{cruise}} \\ & \min P_{\text{hover}} \\ & \text{s.t. } T_{\text{cruise}} \geq 1\,800 \text{ N} \\ & \quad T_{\text{hover}} \geq 20\,600 \text{ N} \end{aligned} \quad (1)$$

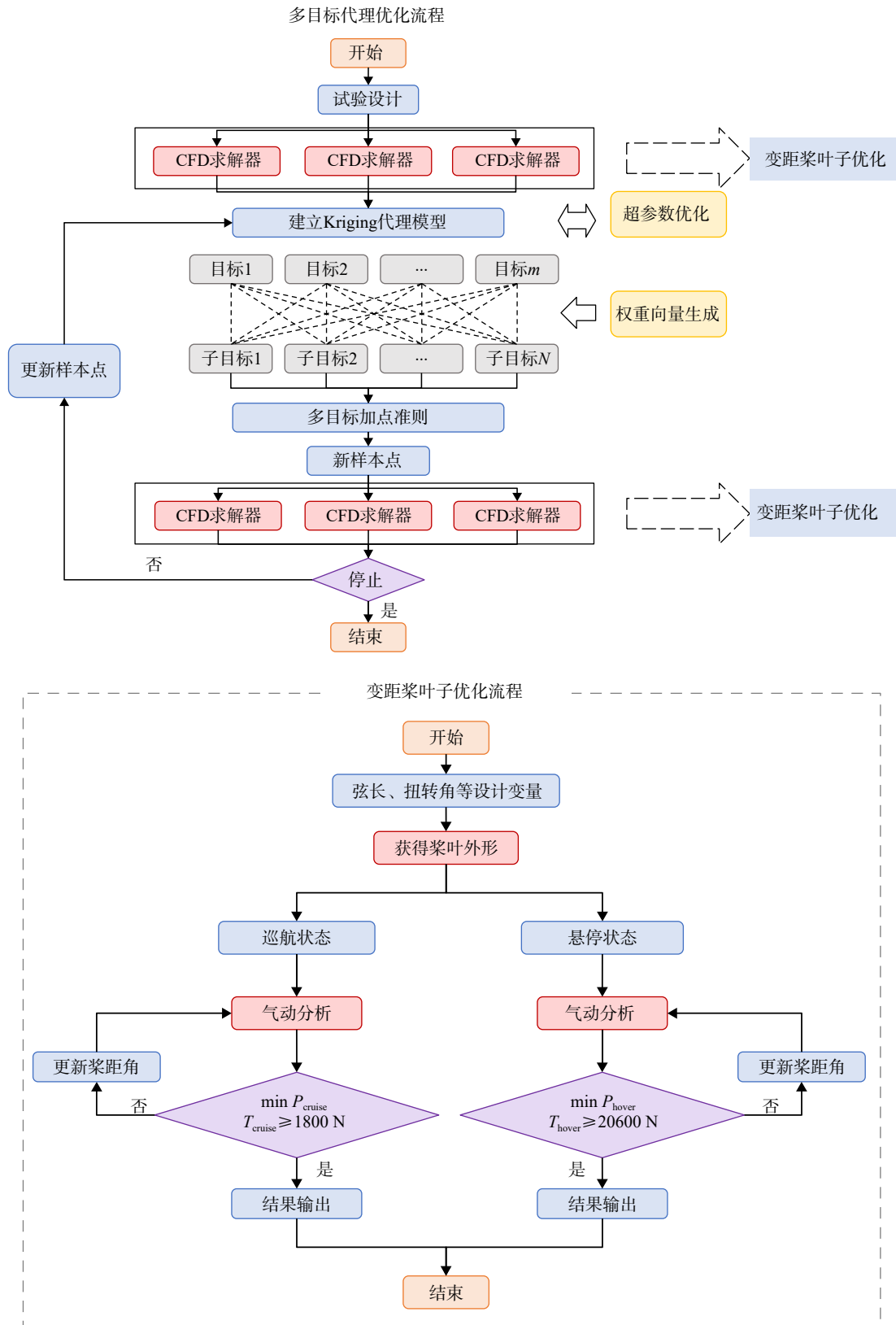


图 3 考虑桨叶变距的优化流程图

Fig. 3 Optimization flowchart considering blade pitch variation

式中 T 为拉力, P 为轴功率, 下标 cruise 表示巡航状态, hover 表示悬停状态。

初始样本点由拉丁超立方抽样法 (Latin hypercube sampling, LHS) 试验设计方法选取 40 个, 采用“EI+MSP”的组合并行加点准则, 最大样本点数为 600 个。采用二次函数法对桨叶几何外

形进行参数化^[13], 共 7 个设计变量, 包括桨根处扭转角、桨尖处扭转角、扭转角函数极值位置、桨根处弦长、桨尖处弦长、最大弦长以及最大弦长位置。

优化耗时 21 h36 min, 优化收敛历程如图 4 所示, 并在多目标优化 Pareto 前沿的首端、中段以及尾端选择典型的 4 个不同外形的桨叶, 分别用

Opt-1、Opt-2、Opt-3、Opt-4 表示, 设计变量范围及 4 种桨叶方案的设计变量取值如表 1 所示, 其弦长及扭转角分布如图 5 所示。 R 为桨叶半径, C 为弦长, r 为径向位置, β 为扭转角。其中 Opt-1 桨叶优先考虑推进效率, 但悬停性能较差, Opt-4 桨叶侧重于悬停效率的提高, Opt-2 桨叶和 Opt-3 桨叶则兼顾了悬停和巡航性能。

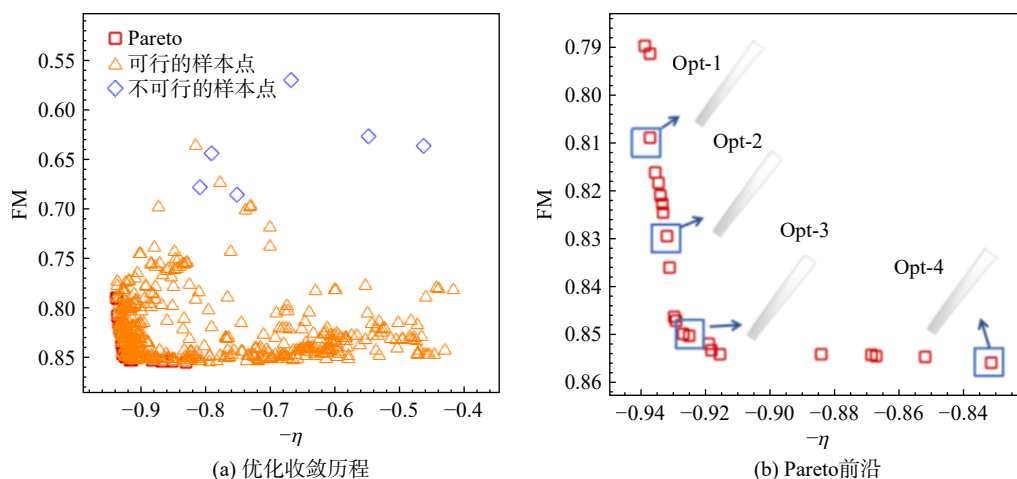


图 4 倾转旋翼桨叶多点多目标优化收敛历程及选取的桨叶外形对应 Pareto 前沿的位置

Fig. 4 Convergence history of multi-point multi-objective optimization for tiltrotor blades and the corresponding positions of selected blade shapes on the Pareto front

表 1 设计变量范围及 4 种桨叶方案的设计变量取值

Table 1 Design variable range and values of design variables for the 4 blade schemes

设计变量	范围		取值			
	上界	下界	Opt-1	Opt-2	Opt-3	Opt-4
桨根处扭转角/(°)	70.00	30.00	39.00	38.44	36.00	32.21
桨尖处扭转角/(°)	40.00	0.00	2.36	2.68	3.51	4.54
扭转角函数极值位置 r_1/R	2.00	1.00	1.70	1.31	1.46	1.42
桨根处弦长 C_1/R	0.25	0.10	0.11	0.11	0.11	0.13
桨尖处弦长 C_2/R	0.15	0.05	0.10	0.11	0.11	0.11
最大弦长 C_3/R	0.25	0.08	0.11	0.12	0.12	0.13
最大弦长位置 r_2/R	0.50	0.20	0.20	0.30	0.30	0.20

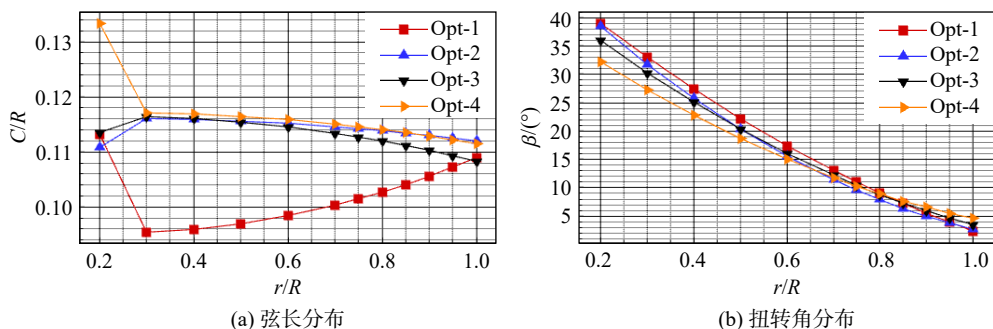


图 5 多点多目标优化桨叶弦长及扭转角分布

Fig. 5 Chord length and twist distributions of the multi-point multi-objective optimized blades

利用 ROTNS 评估得到的 4 个桨叶在悬停状态和巡航状态下的气动特性分别如表 2 和表 3 所示。Opt-3 兼顾考虑了巡航状态和悬停状态的性能,悬停效率达到 75.51%,推进效率达到 85.33%。

表 2 优化桨叶在悬停状态下的气动特性(ROTNS)
Table 2 Aerodynamic characteristics of optimized rotor blades in hover mode (ROTNS)

参数	Opt-1	Opt-2	Opt-3	Opt-4
转速/(r/min)	754	761	743	749
拉力/N	20 623.3	20 608.8	20 601.5	20 604.3
扭矩/(N·m)	6 307.1	6 171.3	6 255.6	6 183.0
轴功率/kW	498.0	491.3	486.7	484.9
悬停效率/%	73.92	74.77	75.51	75.80

表 3 优化桨叶在巡航状态下的气动特性(ROTNS)
Table 3 Aerodynamic characteristics of optimized rotor blades in cruise mode (ROTNS)

参数	Opt-1	Opt-2	Opt-3	Opt-4
转速/(r/min)	400	400	408	429
拉力/N	1 807.0	1 803.0	1 806.7	1 805.1
扭矩/(N·m)	4 398.2	4 428.5	4 410.4	4 371.4
轴功率/kW	184.2	186.2	188.4	196.4
悬停效率/%	87.29	86.08	85.33	81.71

2.2 任务场景驱动的倾转旋翼桨叶气动优化设计

本文的任务场景考虑了垂直起飞、巡航、悬停等典型阶段及其工作时长,忽略了下降和过渡状态的能耗。选取两种典型的场景开展研究,其中任务场景一以巡航为主,任务场景二以悬停为主。以整个任务场景所消耗的总能量为目标,将多点多目标问题转化为单目标问题,同时约束各飞行状态下的拉力。

该优化问题的数学模型如下:

$$\min E_{\text{mission}} = P_{\text{cruise}} \times t_{\text{cruise}} + P_{\text{vertical take-off}} \times t_{\text{vertical take-off}} + P_{\text{hover}} \times t_{\text{hover}}$$
$$\text{s.t. } \begin{aligned} T_{\text{cruise}} &\geq 1\,800\text{ N} \\ T_{\text{vertical take-off}} &\geq 20\,600\text{ N} \\ T_{\text{hover}} &\geq 19\,000\text{ N} \end{aligned}$$

(2)

式中 E_{mission} 表示整个任务场景所消耗的总能量, t 表示时间,下标 cruise、vertical take-off 和 hover 分别表示巡航、垂直起飞和悬停这 3 个飞行阶段。

2.2.1 任务场景一(以巡航为主)

该任务剖面参数如表 4 所示。初始样本点由 LHS 试验设计方法选取 40 个,采用“EI+MSP”的组合并行加点准则,最大样本点数为 300 个。目标函数收敛曲线如图 6 所示。

将优化桨叶命名为 MS-1,其外形如图 7 所示,其扭转角及弦长分布如图 8 所示。弦长分布在根

部较大而逐渐向桨尖减小,负扭较大。

利用 ROTNS 对优化结果 MS-1 桨叶进行评估,在不同飞行模式下的气动特性如表 5 所示,在

表 4 任务场景一(以巡航为主)的任务剖面参数
Table 4 Mission profile parameters for mission scenario 1 (cruise-focused)

飞行模式	高度/km	速度/(m/s)	拉力/N	工作时间/h
巡航	0.1	88.9	1 800	2.80
垂直起飞	0	0	20 600	0.14
悬停	0	0	19 000	0.12

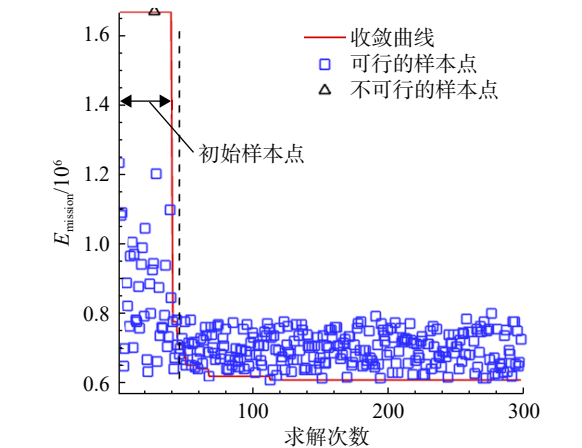


图 6 目标函数收敛曲线(任务场景一)
Fig. 6 Convergence curve of the objective function (mission scenario 1)

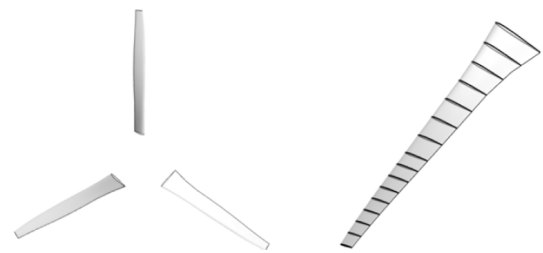


图 7 优化桨叶外形(任务场景一)

Fig. 7 Optimized blade shape (mission scenario 1)

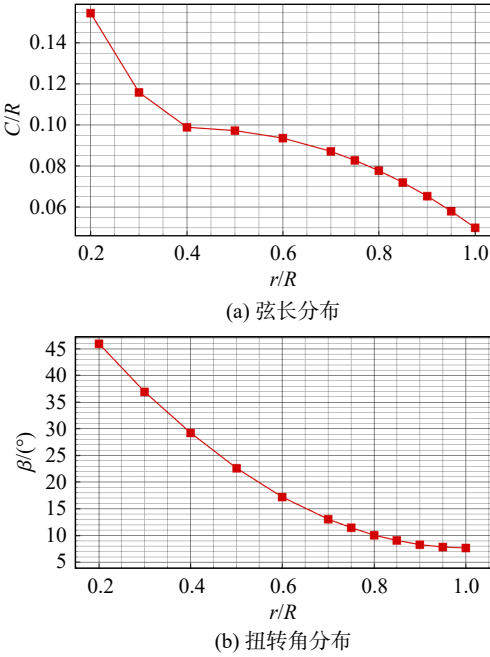


图 8 优化桨叶弦长及扭转角分布(任务场景一)

Fig. 8 Chord length and twist distributions of optimized blades (mission scenario 1)

该任务场景下, 桨叶在不同任务阶段的轴功率与总能耗如表 6 所示, 其中巡航状态下的推进效率为 87.41%, 垂直起飞状态下的悬停效率为 74.21%, 悬停状态下的悬停效率为 74.30%, 整个任务过程中消耗的总能量为 634.6 kW·h。优化桨叶外形使任务总能耗降低, 提高任务中的整体性能, 实现了在多工况下都具有较高的气动性能。

如图 9 所示为优化桨叶 MS-1 分别在巡航和悬停状态下的压力云图及流线。图中 p 为压力, p_0 为当地压力。可以看出, MS-1 桨叶在巡航状态下保持良好的附着流动, 而在悬停状态下由于桨叶根部扭转角较大, 导致桨根处为大迎角状态, 内侧出现流动分离。

2.2.2 任务场景二(以悬停为主)

该任务剖面参数如表 7 所示。初始样本点由 LHS 试验设计方法选取 40 个, 采用“EI+MSP”

表 5 由 ROTNS 评估的优化桨叶在不同飞行模式下的气动特性(任务场景一)

Table 5 Aerodynamic characteristics of the optimized blade at different flight modes evaluated by ROTNS (mission scenario 1)

气动特性	数值		
	巡航	垂直起飞	悬停
桨距角/(°)	42.43	11.43	11.43
转速/(r/min)	412.2	751.0	723.0
拉力/N	1 800.5	20 602.0	19 000.3
扭矩/(N·m)	4 242.4	6 297.7	5 785.9
轴功率/kW	183.1	495.2	438.1
效率/%	87.41	74.21	74.30

表 6 优化桨叶在各任务阶段的轴功率及总能耗(任务场景一)

Table 6 Shaft power and total energy consumption of the optimized blade across mission phases (mission scenario 1)

参数	巡航	垂直起飞	悬停	总能耗/(kW·h)
轴功率/kW	183.1	495.2	438.1	
时间/h	2.80	0.14	0.12	
能耗/(kW·h)	512.7	69.3	52.6	634.6

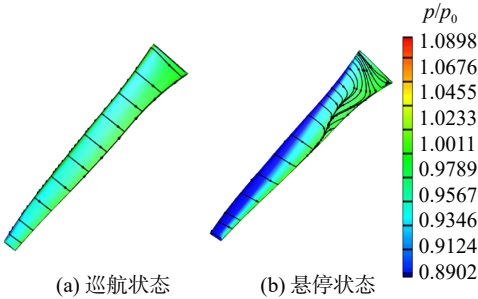


图 9 优化桨叶分别在巡航和悬停状态下的压力云图及流线(任务场景一)

Fig. 9 Pressure contours and streamlines of the optimized blade in cruise and hover modes (mission scenario 1)

表 7 任务场景二(以悬停为主)的任务剖面参数

Table 7 Mission profile parameters for mission scenario 2 (hover-focused)

飞行模式	高度/km	速度/(m/s)	拉力/N	工作时间/h
巡航	0.1	88.9	1 800	0.50
垂直起飞	0	0	20 600	0.14
悬停	0	0	19 000	2.42

的组合并行加点准则, 最大样本点数为 300 个。目标函数收敛曲线如图 10 所示。

将优化桨叶命名为 MS-2, 其外形如图 11 所

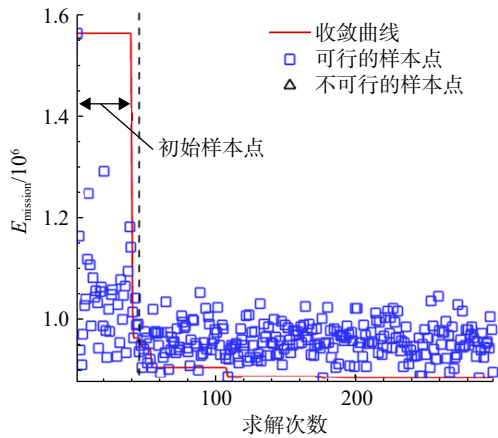


图 10 目标函数收敛曲线(任务场景二)
Fig. 10 Convergence curve of the objective function
(mission scenario 2)

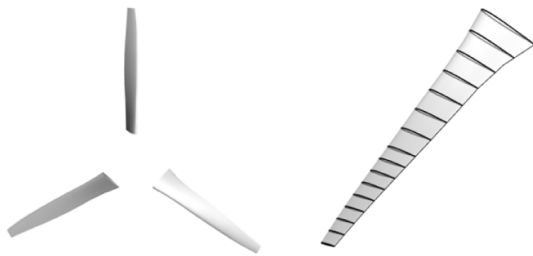


图 11 优化桨叶外形(任务场景二)
Fig. 11 Optimized blade shape (mission scenario 2)

示, 扭转角及弦长分布如图 12 所示。优化桨叶相较任务场景一的优化桨叶的弦长更大。

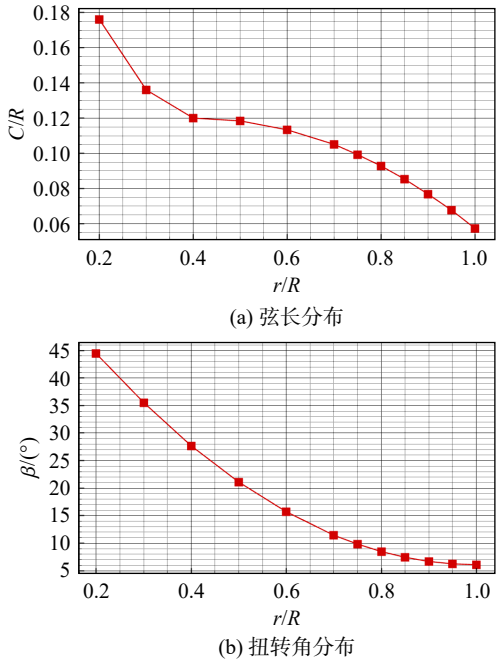


图 12 优化桨叶弦长及扭转角分布(任务场景二)
Fig. 12 Chord length and twist distributions of optimized blades
(mission scenario 2)

利用 ROTNS 对优化结果 MS-2 桨叶进行评估, 其不同飞行模式下的气动特性及总能耗如表 8 所示, 桨叶在不同任务阶段的轴功率与总能耗如表 9 所示。巡航状态下的推进效率为 85.44%, 垂直起飞状态下的悬停效率为 75.13%, 悬停状态下的悬停效率为 75.18%, 整个任务过程中消耗的总能量为 1 210.7 kW·h。由于悬停需要的轴功率高于巡航所需的轴功率, 因此侧重于悬停的任务场景总能耗远高于侧重于巡航的任务场景总能耗。

如图 13 所示为优化桨叶 MS-2 分别在巡航和悬停状态下的压力云图及流线。可以看出, 相较于表 8 由 ROTNS 评估的优化桨叶在不同飞行模式下的气动特性(任务场景二)

Table 8 Aerodynamic characteristics of the optimized blade at different flight modes evaluated by ROTNS (mission scenario 2)

气动特性	数值		
	巡航	垂直起飞	悬停
桨距角/(°)	41.84	9.83	9.83
转速/(r/min)	416.2	753.0	725.0
拉力/N	1 808.4	20 603.2	19 003.3
扭矩/(N·m)	4 319.3	6 203.9	5 704.6
轴功率/kW	188.2	489.2	433.1
效率/%	85.44	75.13	75.18

表 9 优化桨叶在各任务阶段的轴功率及总能耗 (任务场景二)

Table 9 Shaft power and total energy consumption of the optimized blade across mission phases (mission scenario 2)

参数	巡航	垂直起飞	悬停	总能耗/(kW·h)
轴功率/kW	188.2	489.2	433.1	
时间/h	0.50	0.14	2.42	
能耗/(kW·h)	94.1	68.5	1 048.1	1 210.7

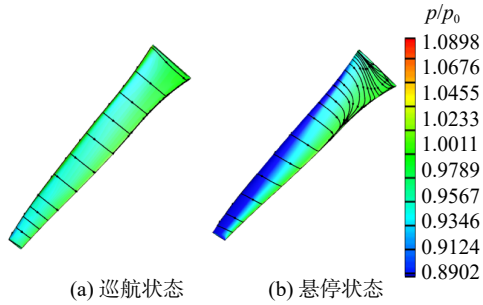


图 13 优化桨叶分别在巡航和悬停状态下的压力云图及流线 (任务场景二)

Fig. 13 Pressure contours and streamlines of the optimized blade in cruise and hover modes (mission scenario 2)

于 MS-1 桨叶, 任务场景二的优化桨叶 MS-2 在悬停状态下桨根处流动分离现象明显减弱。

2.3 方案对比

任务场景驱动的优化结果 MS-1 和 MS-2 与多点多目标优化中分别侧重巡航和悬停性能的 Opt-1 和 Opt-4 结果对比如表 10 所示, MS-1 桨叶(任务场景侧重巡航)在推进效率和悬停效率上均高于 Opt-1, MS-2 桨叶(任务场景侧重悬停)的悬停效率略低于 Opt-4, 但推进效率提升了 4.56%, 综合性能上更优。如图 14 所示悬停状态下, Opt-1 桨叶和 MS-1 桨叶在桨根 $r/R=0.3$ 处前缘负压较大, 压力梯度也更为陡峭, 出现流动分离, 所以悬停效率略低。MS-1 和 MS-2 桨叶的气动性能更接近 Opt-2 和 Opt-3 桨叶的气动性能, 说明基于不同任务场景的需求, 以总能耗为目标, 多方面兼顾考虑了不同飞行模式所需要的能量和效率, 可以更高

表 10 任务场景驱动与多点多目标优化结果对比

Table 10 Comparison of mission-driven and multi-point multi-objective optimization results %

参数	工况	推进效率	悬停效率
任务场景驱动 MS-1	巡航	87.41	
	垂直起飞		74.21
多目标优化 Opt-1	巡航	87.29	
	垂直起飞		73.92
任务场景驱动 MS-2	巡航	85.44	
	垂直起飞		75.13
多目标优化 Opt-4	巡航	81.71	
	垂直起飞		75.80

效地获得有针对性的桨叶外形; 设计优化时间也从 21 h36 min 降低至 6 h33 min(服务器配置: Win10, Intel(R) Core(TM) i7-8700K CPU@3.70 GHz; 内存 64 GB), 优化耗时节省了 69.67%。

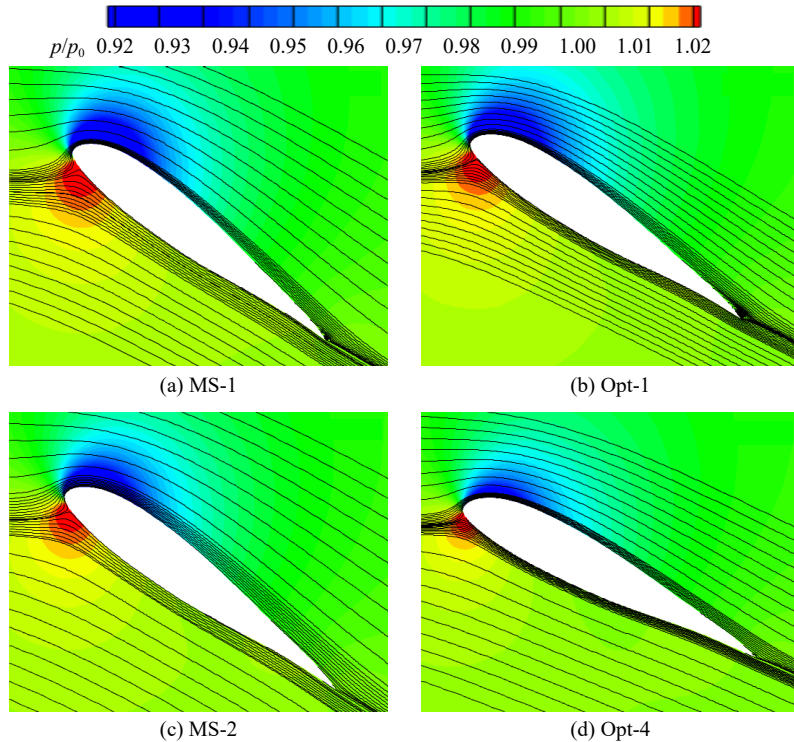


图 14 悬停状态任务场景驱动与多点多目标优化桨叶在 $r/R=0.3$ 处的剖面压力云图

Fig. 14 Pressure contour at $r/R=0.3$ for mission-driven and multi-point multi-objective optimized blades in hover mode

3 结 论

本文针对倾转旋翼机桨叶在悬停状态和巡航状态下的最优外形存在强矛盾这一难题, 以不同任务场景下的总能耗为设计目标, 提出了基于任务场景驱动的任务场景驱动的倾转旋翼桨叶气动优化设计方法。该方法的特点是, 在优化设计过程中得到的每一

个桨叶外形方案, 对于不同工况, 分别通过迭代优化桨距角使得桨叶能耗最低。所得结论如下:

1) 与多点多目标的优化时长相比, 所发展的方法在保证桨叶高气动性能和低能耗的同时, 有效降低优化耗时 69.67%, 为倾转旋翼桨叶设计提供一种思路。

2) 侧重巡航的优化桨叶在悬停状态下内侧出现流动分离, 而侧重悬停的优化桨叶在悬停状态下桨根处流动分离现象明显减弱, 悬停效率得到改善。

参考文献:

- [1] 邓景辉. 高速直升机关键技术与发展[J]. 航空学报, 2024, 45(9): 529085.
Deng Jinghui. Key technologies and development for high-speed helicopters[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(9): 529085. (in Chinese)
- [2] 谭米, 刘英杰. SPRINT 项目推动高速垂直起降飞机发展[J]. 航空动力, 2024(1): 47-49.
Tan Mi, Liu Yingjie. SPRINT promotes the development of HSV-TOL aircraft[J]. Aerospace Power, 2024(1): 47-49. (in Chinese)
- [3] 王宗辉, 杨云军, 赵佳祥. 倾转旋翼机气动设计研究进展[J]. 航空工程进展, 2025, 16(4): 1-12.
Wang Zonghui, Yang Yunjun, Zhao Jiaxiang. Development in aerodynamic design of tiltrotor aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2025, 16(4): 1-12. (in Chinese)
- [4] Le Pape A, Beaumier P. Numerical optimization of helicopter rotor aerodynamic performance in hover[J]. Aerospace Science and Technology, 2005, 9(3): 191-201.
- [5] 李鹏. 倾转旋翼机非定常气动特性分析及气动设计研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
Li Peng. Researches on aerodynamic design and analyses on unsteady aerodynamic characteristics of the tiltrotor aircraft[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [6] Jimenez-Garcia A, Biava M, Barakos G N, et al. Tiltrotor CFD: Part II aerodynamic optimisation of tiltrotor blades[J]. The Aeronautical Journal, 2017, 121(1239): 611-636.
- [7] Huang Yinqiang, Chen Haixin. Rapid aerodynamic optimization design of tiltrotor propeller blades[J]. Wind Turbine Technology, 2019, 61(5): 19-27.
- [8] 王宗辉, 杨云军, 赵弘睿, 等. 多飞行状态倾转旋翼气动优化设计[J]. 航空学报, 2024, 45(9): 529024.
Wang Zonghui, Yang Yunjun, Zhao Hongrui, et al. Aerodynamic optimization design of tiltrotor under multiple flight conditions[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(9): 529024. (in Chinese)
- [9] Stanley O. Integrated aerodynamic and dynamic optimization of tiltrotor wing and rotor system[D]. Troy, US: Rensselaer Polytechnic Institute, 2004.
- [10] 朱秋嫻. 基于非定常动量源方法的倾转旋翼机气动分析及性能优化[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
Zhu Qiuxian. Aerodynamic analysis and optimal design of tiltrotor aircraft based on an unsteady momentum source method[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [11] Leusink D, Alfano D, Cinnella P, et al. Aerodynamic rotor blade optimization at Eurocopter - a new way of industrial rotor blade design[R]. AIAA-2013-0779, 2013.
- [12] Drela M. QPROP formulation[R]. Cambridge, US: Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [13] 许建华. 基于雷诺平均 N-S 方程的螺旋桨气动特性研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2009.
Xu Jianhua. Aerodynamic characteristics of propellers based on Reynolds-averaged Navier-Stokes equations [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2009. (in Chinese)
- [14] Yoon S, Jameson A. Lower-upper symmetric-Gauss-seidel method for the Euler and navier-stokes equations[J]. AIAA Journal, 1988, 26(9): 1025-1026.
- [15] Jameson A, Schmidt W, Turkel E. Numerical solution of the Euler equations by finite volume methods using Runge Kutta time stepping schemes[R]. AIAA-1981-1259, 1981.
- [16] Spalart P, Allmaras S. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows[R]. AIAA-1992-0439, 1992.
- [17] Benek J, Buning P, Steger J. A 3-D chimera grid embedding technique[R]. AIAA-1985-1523, 1985.
- [18] 刘超群. 多重网格法及其在计算流体力学中的应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [19] Leishman J G, Rosen K M. Challenges in the aerodynamic optimization of high-efficiency propellers[J]. Journal of the American Helicopter Society, 2011, 56(1): 12004.
- [20] 刘沛清. 空气螺旋桨理论及其应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
- [21] Ghoddoussi A, Miller L S. A more comprehensive database for low Reynolds number propeller performance validations[R]. AIAA-2016-3422, 2016.
- [22] Jewel J W. Compressibility effects on the hovering performance of a two-blade 10-foot-diameter helicopter rotor operating at tip Mach numbers up to 0.98[R]. NASA-TN-D-245, 1960.
- [23] 韩忠华, 许晨舟, 乔建领, 等. 基于代理模型的高效全局气动优化设计方法研究进展[J]. 航空学报, 2020, 41(5): 623344.
Han Zhonghua, Xu Chenzhou, Qiao Jianling, et al. Recent progress of efficient global aerodynamic shape optimization using surrogate-based approach[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(5): 623344. (in Chinese)
- [24] Krige D G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 1951, 52(6): 119-139.
- [25] Sacks J, Welch W J, Mitchell T J, et al. Design and analysis of computer experiments[J]. Statistical Science, 1989, 4(4): 409-423.
- [26] Jones D R, Schonlau M, Welch W J. Efficient global optimization of expensive black-box functions[J]. Journal of Global Optimization, 1998, 13(4): 455-492.
- [27] Han Z H, Zhang K S. Surrogate-based optimization[M]//Real-world applications of genetic algorithms. Rijeka, Croatia: InTech Book, 2012: 343-362.
- [28] 刘俊. 基于代理模型的高效气动优化设计方法及应用[D]. 西安: 西北工业大学, 2015.
Liu Jun. Efficient surrogate-based optimization method and its application in aerodynamic design[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015. (in Chinese)

(编辑: 秦理曼)