

基于单杆操纵的双轴涡桨发动机稳态调节计划设计 *

孙 越, 黄向华

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 为实现涡桨发动机的单杆操纵, 提出一组基于发动机稳态特性的功率规划具体寻优设计流程。提出巡航状态下的两种综合性能指标, 以兼顾发动机耗油率与螺旋桨效率的优化需求。为解决优化设计过程中稳态特性图难以有效获取的问题, 对稳态求解模型进行了逆算法改进。某型双轴涡桨发动机的仿真结果表明, 逆算法的求解精度与正向算法一致, 且与传统双杆恒转速调节计划相比, 单杆功率规划变转速调节计划使发动机在巡航状态设计工况下的平均耗油率降低了 1.38%, 平均效率/耗油率综合性能指标提升了 2.09%。

关键词: 涡桨发动机; 稳态调节计划; 逆算法; 单操纵杆控制; 优化设计

中图分类号: V231 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2022) 06-200930-08

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 200930

Design of Steady State Control Schedule for Two-Spool Turboprop Engine Based on Single-Lever Control

SUN Yue, HUANG Xiang-hua

(College of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A specific optimization design process of power planning based on engine steady state characteristic was presented to realize the single-lever control of turboprop engine. Two comprehensive performance indexes under the cruise state were presented to give consideration to both optimization requirements of engine specific fuel consumption and propeller efficiency. In order to solve such problem that the steady state characteristic map is difficult to obtain in optimization design process, the steady state model was improved by employing an inverse algorithm. The results of simulation on a two-spool turboprop engine show that the accuracy of inverse algorithm is consistent with that of direct algorithm. Compared with conventional double-lever constant speed control schedule, the single-lever power planning variable speed control schedule has reduced engine's average specific fuel consumption by 1.38% and has increased average efficiency/specific fuel consumption comprehensive performance index by 2.09% under designed cruise state.

Key words: Turboprop engine; Steady state control schedule; Inverse algorithm; Single-lever control; Optimization design

1 引 言

涡桨发动机在低马赫数下有耗油率低、推进效

率高、起飞推力大、迎风面积小等优点,被广泛应用于军用中小型运输机、民用支线客机和通用飞机等领域^[1]。带自由涡轮的双轴涡桨发动机是一种使用

* 收稿日期: 2020-11-22; 修订日期: 2021-02-07。

基金项目: 国家自然科学基金 (51576097; 51976089)。

作者简介: 孙 越, 硕士生, 研究领域为涡桨发动机建模与控制。

通讯作者: 黄向华, 博士, 教授, 研究领域为航空发动机建模与控制。

引用格式: 孙 越, 黄向华. 基于单杆操纵的双轴涡桨发动机稳态调节计划设计[J]. 推进技术, 2022, 43(6):200930.
(SUN Yue, HUANG Xiang-hua. Design of Steady State Control Schedule for Two-Spool Turboprop Engine Based on Single-Lever Control[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(6):200930.)

非常广泛的涡桨发动机。早期的涡桨发动机采用机械液压式控制系统^[2],发动机和螺旋桨单独进行控制,飞行员需要同时调节功率杆和选速杆两根操纵杆^[3]以适应不同的飞行状态。该传统控制方案虽有利于降低控制系统复杂度、增加飞行员的操纵自由度,但另一方面也使得涡桨发动机的效率、耗油率等性能参数难以达到最优,先进控制方案的开发和应用也受到了限制。

欧洲四国合作研制的第四代涡桨发动机 TP400-D6 首次将螺旋桨的控制系统也综合到全权限数字式发动机控制系统(FADEC)中^[4]。它采用燃油和螺旋桨一体化调节技术,能自动控制桨叶的运行状态,使发动机螺旋桨始终保持在一个最佳的工作状态。这种控制方式使得飞行员只需操纵一个控制杆,减轻了操纵的任务量,提高了安全性。普惠的 PT6A-68 发动机和 GE 的 Catalyst 发动机也同样基于全权限数字发动机和螺旋桨控制(FADEPC)系统,实现了类似的单杆规划控制以替代传统的液压机械式多杆控制。可见,涡桨发动机单杆式控制系统综合螺旋桨控制和发动机控制,是未来涡桨发动机控制的发展趋势^[5]。

Považan 等^[6]针对双转子涡桨发动机提出了涡桨发动机的发动机推力管理系统(ETMS),当给定飞行条件和功率杆角度(PLA)时,ETMS 可解算得到高压转子转速指令值和螺旋桨转速指令值,一定程度上解决了工程实际中由于燃油种类的不同而导致的功率不匹配问题。夏天乾^[2]以某型微型涡桨发动机为对象,基于地面试车数据,探究并实现了采用单功率杆控制的变转速控制系统,研究了功率规划调节计划的设计方法,使得发动机正常运行的情况下能获得最低的油耗,同时借助参考模型滑模控制算法来设计控制律以跟随 ETMS 给出的转速指令。黄勇^[7]以推力为需求设计了涡桨发动机综合调节计划,该调节计划能够优化螺旋桨的转速和桨叶角度匹配,使得螺旋桨始终工作在最优的效率点处,并通过半物理试验手段对该综合调节计划进行了试验验证。

双轴涡桨发动机一般有功率规划和拉力规划两

种单杆操纵方案。典型涡桨发动机单杆功率规划方案的结构如图 1 所示。当采用功率规划时,首先根据 PLA 插值出指令功率,再进一步根据转子换算转速计划插值,获得动力涡轮折合转速指令以及燃气涡轮折合转速指令,最后分别根据飞行条件得到实际的螺旋桨转速指令与燃气涡轮的转速指令。其中转子换算转速计划是通过离线插值表实现,从而满足效率高、耗油率低和加减速快等不同的需求。可以看到,在上述单杆功率规划调节计划中,从指令功率到指令转速之间的插值关系是最重要的一环,对于给定的目标功率,恰当地选取双转子的指令转速从而使得某个期望的性能指标最优,是设计单杆功率规划调节计划时最为重要的工作。

Považan 虽然提出了 ETMS 的概念,但没有给出具体的调节计划寻优设计方法;夏天乾的研究主要基于地面状态的稳态试车数据,其样本点个数较为有限,且由于缺乏空中运行数据,导致只能对发动机的耗油率进行优化;黄勇对匹配工作点的优化主要针对螺旋桨效率,未能兼顾耗油率这一设计巡航状态调节计划时必须考虑的因素;史永运等^[8]的研究虽然综合考虑了效率与耗油率,但只探讨了在一定的匹配推力系数下,最优转速随飞机质量和高度的变化。此外,以上研究均未涉及如何高效地获取适用于单杆功率规划设计的发动机稳态特性图。

本文在分析涡桨发动机稳态特性的基础上,给出一组具体的调节计划寻优流程,用于双轴涡桨单杆功率规划的设计;提出两个综合性能指标,可兼顾巡航状态下耗油率与效率的优化需求;提出一种涡桨发动机稳态模型求解逆算法,可用于涡桨发动机稳态特性图的高效求取。

2 单杆稳态调节计划设计方法

2.1 单杆调节计划设计的问题描述

获取稳态工作特性是设计涡桨发动机稳态调节计划的前提。一般可通过下述稳态特性图来表示该特性,如图 2 所示。

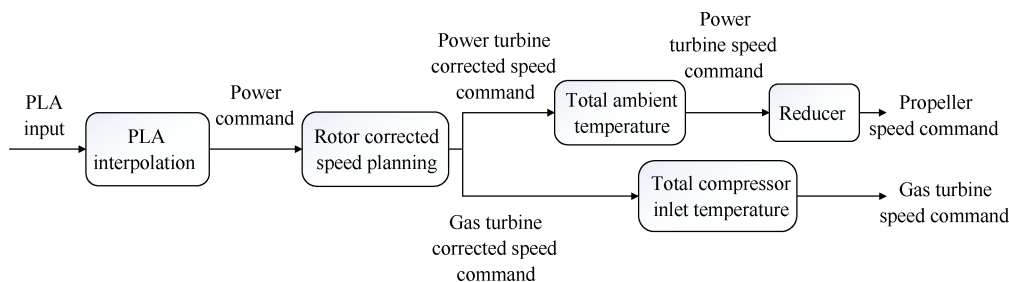


Fig. 1 Typical structure of power planning control for two-spool turboprop engine

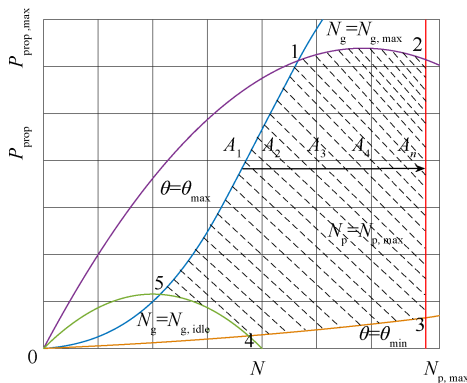


Fig. 2 Typical steady state characteristic map of two-spool turboprop engine

图2中横轴为动力涡轮转速 N_p ,纵轴为螺旋桨吸收的功率 P_{prop} 。除特别标注单位的情况以外,本文涉及的转速、功率均为以设计点转速、功率为基准的百分比相对值。显然,涡桨发动机运行的每一个稳态均可表示成图中某个确定的点。由于存在各种机械、气动方面的限制,涡桨发动机的稳态工作点被约束在一个范围(图2中1,2,3,4,5所包围的虚线阴影区域)之内。这其中主要包括燃气涡轮最大、最小(慢车)转速限制 $N_{g,max}$ 与 $N_{g,idle}$,巡航状态最大、最小桨距角限制 θ_{max} 与 θ_{min} ,以及动力涡轮最大转速限制 $N_{p,max}$ 等^[2]。此外,根据需要还可给定“等最小拉力线”以进一步限制稳态工作点的选择范围,从而防止巡航状态下出现螺旋桨拉力不满足要求的情况。

显然对于某个给定的功率值,有多个可行的稳态点可供选择(如图2中黑色线条上的 A_1, A_2, A_3 等),在这些稳态工作点处,虽然螺旋桨吸收的功率相同,但发动机耗油率等性能指标却各不相同。传统的双杆操纵方案一般在控制动力涡轮转速恒定的同时,给定不同的目标功率,不能使得发动机在每个功率点处的耗油率、效率等性能指标达到最优;而当使用单杆操纵时,若使用单杆给定目标螺旋桨功率,则必然能在图2所示的约束范围内找到使得性能指标最优的一组双转子转速,这使得优化设计成为可能。

通过上述分析,涡桨发动机稳态单杆调节计划的设计问题可以描述为:在图2所示的稳态特性图上,寻找一条确定的曲线,使得当发动机工作在这条曲线上的每一点时,都满足在该点对应功率下,与优化需求对应的性能指标为限定范围内的最优值。由于该曲线描述了目标功率与最优转速之间的对应关系,本文将之称为“最优转速插值曲线”。

2.2 性能指标设计及寻优思路

在对涡桨发动机的巡航状态调节计划进行设计

时,总是希望螺旋桨效率 η 和发动机耗油率 sfc 这两个指标各自分别达到最优。然而当高度 H 、马赫数 Ma 一定时,使得涡桨发动机效率最优和耗油率最优的几乎不可能是同一个稳态工作点。为了兼顾效率和耗油率,本文提出以下两个综合性能指标:

指标1:

$$f_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{\eta}{\eta_{ds}} + \frac{sfc_{ds}}{sfc} \right) \quad (1)$$

指标2:

$$f_2 = \frac{\eta/sfc}{\eta_{ds}/sfc_{ds}} \quad (2)$$

式中下标 ds 表示发动机设计点。

f_1, f_2 均与效率正相关,与耗油率负相关,因此 f_1, f_2 越高即表示涡桨发动机的综合性能越好。考虑到数量级的问题,以设计点值为基准对 f_1, f_2 做归一化处理,使其在设计点处的值均为1。对 sfc, f_1, f_2 等性能指标进行寻优的步骤如下:

步骤(1):确定所要调节的螺旋桨功率范围上限 $P_{prop,max}$ 与下限 $P_{prop,min}$,并在该范围内确定需要计算的功率点,同时对于每一个功率点,进一步合理划分该功率下 N_p 的范围。

步骤(2):在每一个确定的功率下,作出给定性能指标随 N_p 变化的曲线,利用多项式进行拟合,如图3所示。其中,图3(a)为 sfc 随 N_p 的变化曲线,图3(b)为 f_1 随 N_p 的变化曲线。

步骤(3):通过对步骤(2)中的多项式求导来获取该功率下性能指标极值点对应的 N_p 值。

步骤(4):对每一个功率点,将步骤(3)中获得的最优 N_p 再次输入稳态模型中进行计算,得出每个功率下的最优 N_g 。

步骤(5):汇总所有功率下所需性能指标的极值点,得到最优稳态工作线以及目标功率与 N_p, N_g 之间的插值图表。

2.3 稳态求解模型的逆算法改进

2.1节所述的稳态特性图通常可由发动机稳态模型求解获得。如图4所示,双轴涡桨稳态模型的计算输入量为燃油流量 W_f 和桨距角 θ ,通过多步N-R迭代^[9],最终获得满足平衡残差要求的双转子转速 N_g, N_p 以及各压缩部件的压比系数 Z_c, Z_g, Z_p ^[10]。在求取稳态特性图时,需要先遍历工作包线内的所有 W_f 和 θ ,得到尽可能多的稳态工作点数据,再利用插值的方法获得各条等螺旋桨功率 P_{prop} 线,最后在这些等螺旋桨功率线的基础上进行优化设计。该设计方法在使

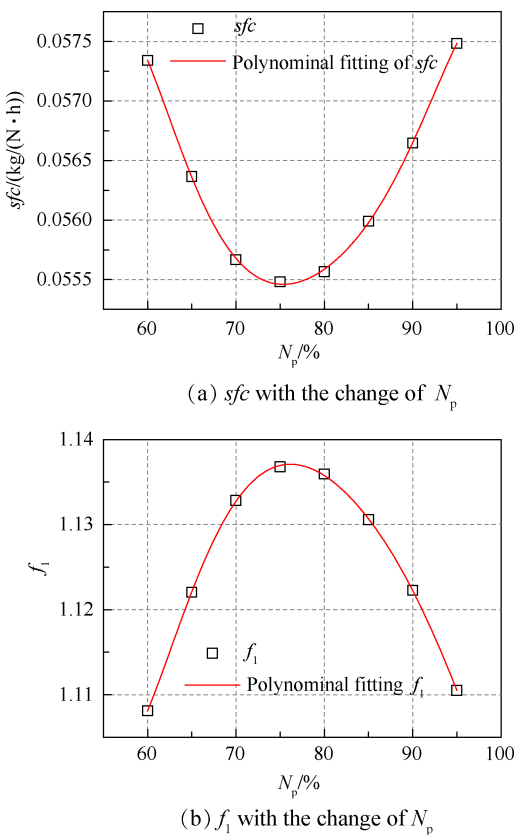


Fig. 3 Performance indexes with the change of N_p

用时常遇到如下问题：

(1) 计算量大, 为了获得较精确的等 P_{prop} 线, 必须计算尽可能多的工作点, 且插值求取等 P_{prop} 线的过程存在误差。

(2) N_g, N_p, P_{prop} 等直接反映涡桨发动机负荷与状态的参数往往需从发动机平衡后的结果中读取作为约束条件, 容易出现参数超界。

(3) 由于包线拓展十分困难, 所设计出的调节计划通常仅适用于某个特定的飞行条件^[11]。当希望对飞行包线内其他飞行高度 H 、马赫数 Ma 下的发动机调节计划进行优化设计时, 重新优化的计算成本

较高。

针对以上问题, 本项目提出通过逆算法进行稳态计算得到所需参数。该逆算法的思路是事先给定部分或全部被控参数, 将其作为迭代中的约束或模型的输入量, 再合理地选取相应参数来取代发动机平衡残差方程组中的自变量, 从而求解可调参数, 如表 1 所示。

Table 1 Comparison between two algorithms' variables

Algorithm	Constrained parameters	Variables to be solved
Direct algorithm	W_f, θ	N_g, N_p, Z_c, Z_g, Z_p
	N_g, N_p	$W_f, \theta, Z_c, Z_g, Z_p$
Inverse algorithm	N_g, N_p	H, Ma, Z_c, Z_g, Z_p
	P_{prop}, N_p	W_f, N_g, Z_c, Z_g, Z_p
	T_{41}, θ	W_f, N_g, Z_c, Z_g, Z_p

逆算法稳态模型一般仍采用 N-R 法迭代求解, 迭代收敛的判定方法与正向算法一致。采用逆算法的优势在于：

(1) 只需要进行一次发动机非设计点的平衡计算, 就可以求解出该发动机的全部可调参数, 能够节省计算成本, 对于稳态调节计划的设计而言较为便利。

(2) 可以事先根据转速、功率、温度等关键参数的范围限制给定约束变量, 一定程度上规避参数超限的问题。

(3) 可以根据具体调节计划的设计需求, 组合出多种参数置换方式, 以适用于不同的发动机类型。

对于定几何的双轴涡桨发动机而言, 可调参数只有 W_f 和 θ , 但当发动机的可调参数越多时, 逆算法的优势将越明显。本文主要研究双轴涡桨的单杆功率规划设计, 因此考虑给定 P_{prop}, N_p 约束的求解方案, 对应的计算流程如图 5 所示。

与图 4 相比, 图 5 中所示逆算法稳态模型将被控

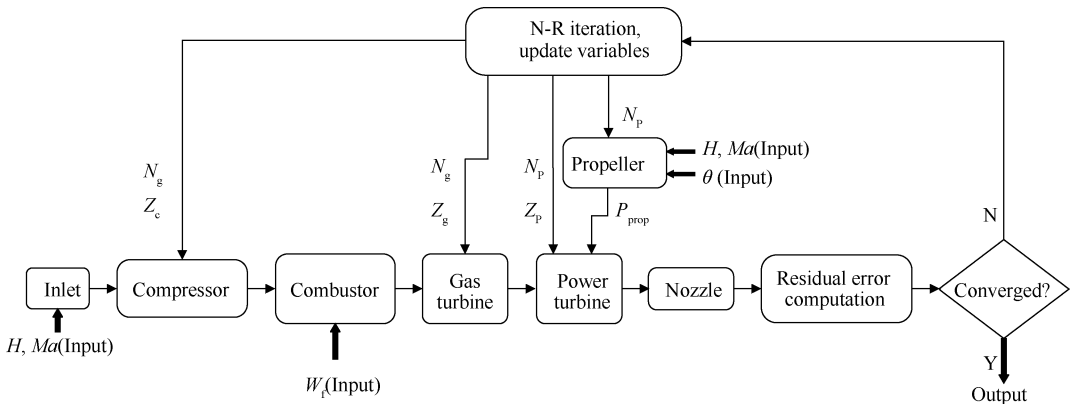


Fig. 4 Calculation process of conventional steady state model for two-spool turboprop engine

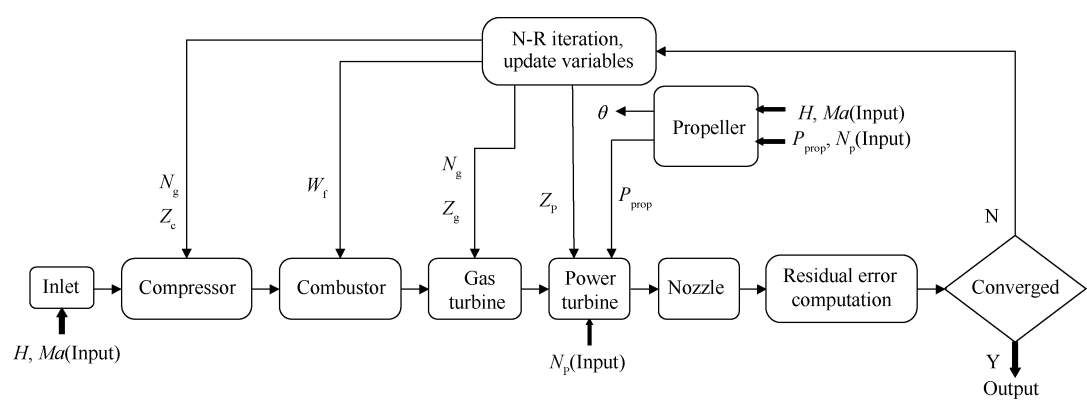


Fig. 5 Calculation process of steady state inverse algorithm model

参数 P_{prop}, N_p 作为迭代中的约束,而可调参数 W_f 和 θ 则成为了稳态模型的计算输出量。考虑到双轴涡桨发动机的稳态特性图正是以 P_{prop}, N_p 为坐标轴,因此上述逆算法非常适合求取单杆功率规划设计所需的相关稳态工作点参数。

逆算法模型要求给定的被控量在迭代过程中不变,从而将其作为约束条件使用,但功率、温度等参数通常都是某个部件模型的输出量,会随着每次计算发生变化。为了解决这个矛盾,必须对原有的部件性能计算方法进行适当的修改。以螺旋桨为例,传统稳态模型迭代求解的过程中,当运行到螺旋桨部件计算时,若环境条件、螺旋桨气动系数、动力涡轮转速给定,螺旋桨的功率 P_{prop} 即是桨距角 θ 的单值函数。

$$P_{\text{prop}} = f(\theta)$$

(3)

逆算法的计算需要根据螺旋桨功率 P_{prop} 反求出桨距角 θ 。本文采用基于片条理论的螺旋桨模型,其部件计算过程较为复杂,涉及到求解干涉角时的迭代、求取翼型升阻力系数时的二维插值、求取总体推力/扭矩时的累加求和等^[12-13]。这也意味着式(3)的逆运算

$$\theta = f^{-1}(P_{\text{prop}})$$

(4)

无法显式给出。本文采用的解决方式是用数值迭代法求解所需的 θ ,也即找出合适的 θ_k ,满足以下条件,式中下标 k 表示迭代步数。

$$|f(\theta_k) - P_{\text{prop}}| < \varepsilon$$

(5)

或者

$$\left| \frac{f(\theta_k)}{P_{\text{prop}}} - 1 \right| < \varepsilon$$

(6)

当 $f(\theta_k)$ 与给定的 P_{prop} 足够接近时,可认为二者相等,此时的 θ_k 即为所求的桨距角值。用误差容限 ε 作为衡量 $f(\theta_k)$ 与 P_{prop} 是否相等的判据,其值通常为一个很小的正数,本文取 $\varepsilon = 1 \times 10^{-4}$ 。

以式(5)为例简要说明求解过程。为方便起见,不妨令式(5)中不等号左边绝对值内的部分见式(7),用差分代替微分,见式(8)。

$$f(\theta_k) - P_{\text{prop}} = g(\theta_k)$$

(7)

$$g'(\theta_k) = \frac{dg(\theta_k)}{d\theta_k} = \frac{g(\theta_{k+1}) - g(\theta_k)}{\theta_{k+1} - \theta_k}$$

(8)

整理可得

$$\theta_{k+1} = \theta_k + [g'(\theta_k)]^{-1} [g(\theta_{k+1}) - g(\theta_k)]$$

(9)

令

$$g(\theta_{k+1}) = C'_{\text{iter}} g(\theta_k), 0 < |C'_{\text{iter}}| < 1$$

(10)

以消除右侧含有“ $k+1$ ”的项,从而避免隐式迭代并保证收敛,其中 C'_{iter} 是用于控制收敛速度的“牛顿下山因子”。将式(10)代入(9)中,再令 $C_{\text{iter}} = 1 - C'_{\text{iter}}$,可得到中心差分迭代格式

$$\theta_{k+1} = \theta_k - \left[\frac{g(\theta_k + \Delta\theta_k) - g(\theta_k - \Delta\theta_k)}{2\Delta\theta_k} \right]^{-1} C_{\text{iter}} g(\theta_k)$$

(11)

以及割线迭代格式

$$\theta_{k+1} = \theta_k - \left[\frac{g(\theta_k) - g(\theta_{k-1})}{\theta_k - \theta_{k-1}} \right]^{-1} C_{\text{iter}} g(\theta_k)$$

(12)

割线格式对导数的光滑性要求较低,有利于实现计算的较快收敛^[14],故本文选用该格式进行求解。计算前需要选择两个初始桨距角作为迭代初值,对于本算例而言,分别选择巡航状态下的最小和最大桨距角一般即可保证收敛。逆算法模型中的螺旋桨部件计算流程如图6所示。

为了验证逆算法求解方式的计算精度,首先使用正向算法,给定设计点燃油量 W_f 与桨距角 θ ,以设计点参数为初猜值进行稳态计算。迭代收敛后,记录此时 N_p 与 P_{prop} 的计算结果,并将其作为逆算法模型的输入量,再次计算,比较两者最终的输出结果及相对误差,计算结果如表2所示。

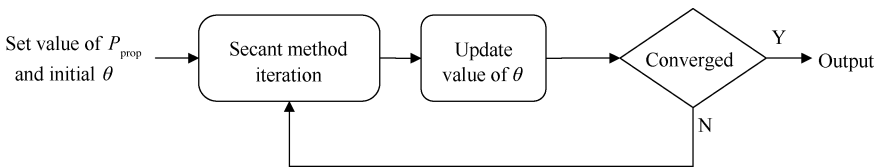


Fig. 6 Calculation process of propeller component

Table 2 Comparison between two algorithms' computation results

Algorithm	Direct algorithm		Inverse algorithm		Relative error of inverse algorithm's iteration results
Input	$W_p/(\text{kg/s})$	0.082800000	$N_p/\%$	99.941900000	—
	$\theta/(^{\circ})$	44.245000000	$P_{\text{prop}}/\text{MW}$	1.076890800	—
Iteration result	$N_p/\%$	99.941900000	$W_p/(\text{kg/s})$	0.082800020	2.415×10^{-7}
	$P_{\text{prop}}/\text{MW}$	1.076890800	$\theta/(^{\circ})$	44.245000002	4.521×10^{-11}
	Z_c	0.727100000	Z_c	0.727100180	2.476×10^{-7}
	Z_g	0.641400000	Z_g	0.641425500	3.976×10^{-5}
	Z_p	0.707300000	Z_p	0.707385000	1.202×10^{-4}
	$N_g/\%$	99.994000000	$N_g/\%$	99.994069000	6.900×10^{-7}

由上述对比可见,逆算法与传统正向算法的计算结果高度一致,完全适用于发动机稳态数学模型的求解。

3 巡航状态下的仿真验证

3.1 各性能指标的优化效果对比

本文在 $H = 3\text{km}$, $Ma = 0.4$ 的设计点工况下,采用 2.2 节所述方法,对某型双轴涡桨发动机的单杆巡航调节计划进行了优化设计。传统的双杆操纵调节计划是通过选速杆给定螺旋桨转速,通过桨距角调节该转速稳定在设定值附近(一般为 100% 设计点转速),同时通过功率杆给出螺旋桨功率的目标值,因此本文也求取了该恒转速调节计划下的相应性能指标值,以供比较验证。各性能指标的优化效果如图 7 所示。

由图 7 可见,相比恒转速调节计划,采用单杆功率规划后,发动机在巡航状态下的各性能指标均得到了相应的优化。其中,图 7(a)给出了 sfc 的优化效果对比,显然在各个目标功率下,最优转速处的 sfc 相比 100% 设计点转速处均有所下降,且低功率下 sfc 的优化效果尤为明显。在本文所划定的巡航状态功率范围内, sfc 平均下降了 1.38%,最多可下降 5.79%。

图 7(b)与图 7(c)分别给出了综合性能指标 f_1 与 f_2 的优化效果对比,可见 f_1 与 f_2 均有提升,优化后的 f_1 相比恒转速调节计划平均上升了 0.95%,最多可上升 4.19%; f_2 平均上升了 2.09%,最多可上升 9.24%。由于涡桨发动机的主要优势正是在于亚声速巡航状态

下的低耗油率与高推进效率,因此上述各性能指标的优化对于涡桨发动机巡航性能的进一步提升有着显著的意义。

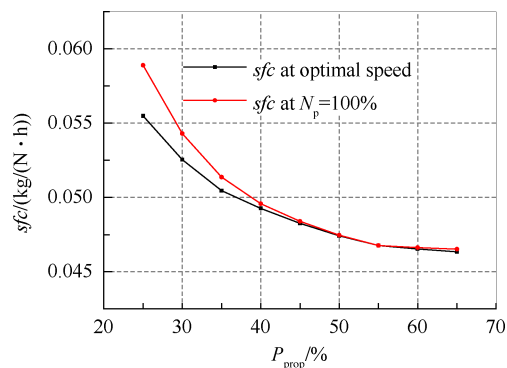
3.2 最优转速插值曲线

汇总各功率下的最优转速,即可得到最优转速插值曲线,用于巡航状态下的单杆功率规划控制,如图 8 所示。

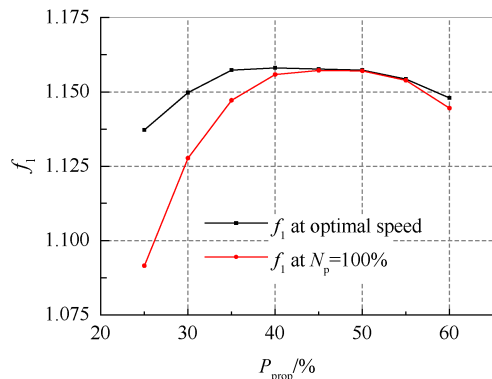
图 8(a)、图 8(b)和图 8(c)分别给出了性能指标 sfc , f_1 和 f_2 所对应的最优转速。可见,各个性能指标所对应的最优转速随目标功率总体呈单调上升的趋势,且在各个目标功率下, sfc 的最优转速相比 f_1 和 f_2 的最优转速普遍较低,而 f_1 和 f_2 的最优转速彼此较为接近,这证明指标 f_1 和 f_2 综合考虑了耗油率和效率的性能需求,将其作为调节计划优化的依据是可行的。

上述曲线以动力涡轮转速、螺旋桨功率为坐标轴,因此即为 2.1 中所要设计的最优转速插值曲线,发动机工作时如果运行在该稳态工作线上,将获得比传统恒转速调节计划更好的性能。飞行员在巡航过程中,只需采用单杆指定目标螺旋桨功率,再由控制系统进一步根据上述最优转速插值曲线来调节双转子转速。显然,这种单杆操纵的方案能在简化操作的同时,提升推进系统的整体性能。

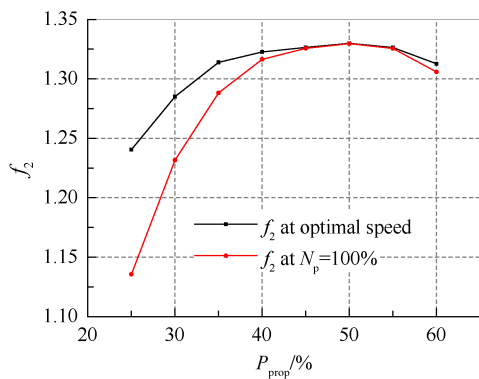
需要特别注意的是,转速大于 100% 的工作点一般只允许在较短时间内动态运行^[15],发动机不能长时间在该状态下稳态工作,但本文从理论角度出发,也求取了 100% ~ 110% 的一部分最优稳态转速点以供参考。此外,由于本文设计的单杆调节计划中,螺



(a) Optimization effect of sfc



(b) Optimization effect of f_1

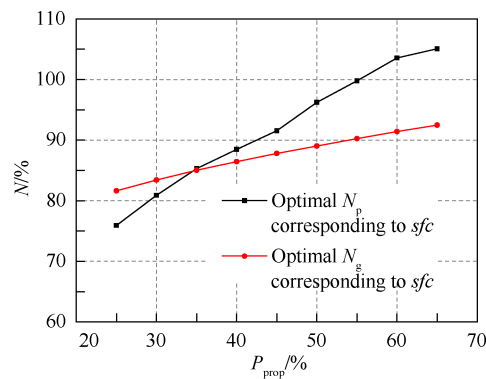


(c) Optimization effect of f_2

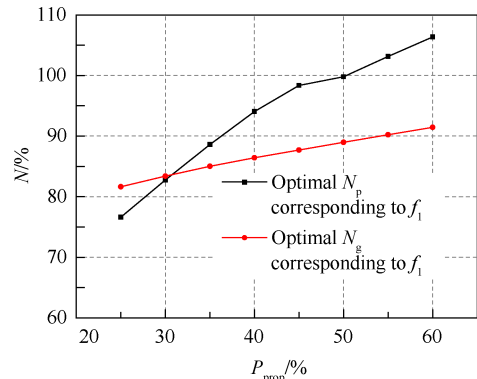
Fig. 7 Optimization effect of different performance indexes

旋桨功率为开环给定,因此在实际动态运行时,即使双转速能稳定在期望值,由于设计中存在的舍入误差、拟合误差、迭代误差等因素,螺旋桨的功率响应可能存在稳态误差。在后续工作中,应分析上述稳态误差的影响,研究减小或者消除功率稳态误差的方法。

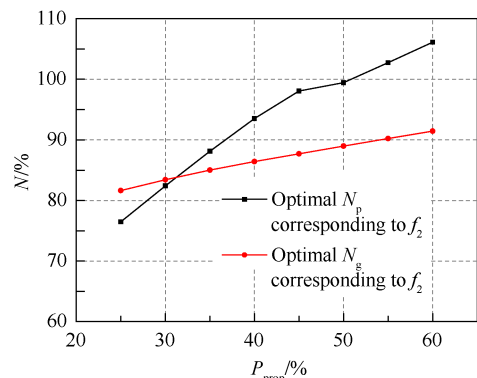
以同样的思路,还可在稳态特性图上获取最大拉力工作线、最优效率工作线等。本文虽仅以巡航状态下的优化设计为例进行了仿真验证,但采用的稳态调节计划设计思路可拓展到发动机的其他工作状态下(如最大状态等),此时在寻优的过程中,性能指标应根据设计需要,改为其他所需参数,从而适应对于发动机不同工作状态的优化需求。



(a) Optimal speed corresponding to sfc



(b) Optimal speed corresponding to f_1



(c) Optimal speed corresponding to f_2

Fig. 8 Optimal speed corresponding to different performance indexes

4 结 论

通过本文的理论分析与仿真验证,可得以下结论:

- (1) 本文提出的两种综合性能指标兼顾了耗油率和效率的优化需求;逆算法稳态求解方式能节约计算资源并规避参数超限的问题,适用于双轴涡桨发动机单杆功率规划的优化设计。
- (2) 相比传统双杆恒转速调节计划,本文设计的单杆功率规划变转速调节计划可以在简化飞行员操作的同时,降低发动机耗油率并提高螺旋桨效率,巡

航状态下的平均耗油率可降低1.38%,平均效率/耗油率综合性能指标可提升2.09%。

致谢:感谢国家自然科学基金的资助。

参考文献

- [1] Chen Huairong, Wang Xi, Wang Haonan, et al. Inverted Decoupling and LMI-Based Controller Design for a Turboprop Engine with Actuator Dynamics[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, 33(6): 1774-1787.
- [2] 夏天乾. 可变桨距微型涡桨发动机控制系统设计与试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [3] 张孟伟. 单杆操控的可变桨距微型涡桨发动机控制系统设计与验证[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- [4] 黄佳沁. 螺旋桨—发动机—飞机一体化起飞模型与控制规律的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [5] 陈怀荣, 王曦. 基于部件特性的螺旋桨数学模型通用建模算法[J]. 推进技术, 2019, 40(8): 1681-1692. (CHEN Huai-rong, WANG Xi. General Modeling Algorithm for Propeller Mathematical Model Based on Component Characteristics[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(8): 1681-1692.)
- [6] Považan J, Andoga R, Főző L, et al. Introduction to Advanced Modeling and Control of Turboprop Engines[C]. *Lisbon: 2012 IEEE 16th International Conference on Intelligent Engineering Systems*, 2012.
- [7] 黄勇. 涡桨发动机综合控制规律设计与验证[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [8] 史永运, 钟易成, 邓君湘, 等. 涡轮螺旋桨动力飞机桨发匹配性能仿真研究[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(4): 116-120.
- [9] 田超, 黄向华, 邓志伟. 涡轮螺旋桨发动机建模与控制仿真[J]. 航空动力学报, 2010, 25(11): 2599-2605.
- [10] 贾琳渊. 变循环发动机控制规律设计方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2017.
- [11] 陈玉春, 贾琳渊, 任成, 等. 变循环发动机稳态控制规律设计的新方法[J]. 推进技术, 2017, 38(10): 2262-2270. (CHEN Yu-chun, JIA Lin-yuan, REN Cheng, et al. An Innovative Method for Design of Steady State Control Law for Variable Cycle Engines[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(10): 2262-2270.)
- [12] 田超. 航空涡桨发动机建模与控制的仿真研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [13] 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.
- [14] 邓志伟, 黄向华, 田超. 涡桨发动机螺旋桨实时建模技术[J]. 航空动力学报, 2014, 29(2): 434-440.
- [15] GJB241A-2010, 航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范[S].

(编辑: 张贺)