

# 航空发动机起动过程摩擦阻力矩计算分析

崔金辉<sup>1</sup>,雷杰<sup>2</sup>

(1.中国航发沈阳发动机研究所,沈阳 110015;2.中国飞行试验研究院,西安 710089)

**摘要:** 扭矩特性分析是航空发动机起动仿真数学模型建立的重要环节,其中摩擦阻力矩因缺少相应的经验公式难以确定。为了得到起动过程的摩擦阻力矩,借助于某型发动机台架试车数据,根据转速变化率与扭矩的关系,在冷态和热态2种条件下分别对转速变化率和阻力矩进行计算,得到了冷、热态下发动机起动过程摩擦阻力矩,并分析了大气温度对冷态阻力矩的影响规律。以此建立起动过程数值仿真模型,完成了摩擦阻力矩对起动过程转速的影响分析。计算结果表明:摩擦阻力矩随着发动机转速的增加呈减小趋势;在冷态条件下,随着大气温度的降低,摩擦阻力矩逐渐增大;起动过程转速变化率随之减小。

**关键词:** 起动;摩擦阻力矩;数值仿真;转速变化率;航空发动机

**中图分类号:** V233.6+3

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13477/j.cnki.aeroengine.2021.01.002

## Calculation and Analysis of Friction Resistance Moment in Aeroengine Starting Process

CUI Jin-hui<sup>1</sup>, LEI Jie<sup>2</sup>

(1.AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China; 2. Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

**Abstract:** The analysis of torque characteristics was an important part of the establishing mathematical model of aeroengine starting simulation. The friction resistance moment was difficult to be determined because of the lack of the corresponding empirical formula. In order to obtain the friction resistance moment in the starting process, according to the relationship between the rotating speed and the torque, the rotating speed and the resistance moment were calculated by an engine bench test data under the cold and hot conditions. The friction resistance moment in the engine starting process was obtained under the cold and hot conditions, and the influence law of atmospheric temperature on the cold condition resistance moment was analyzed. The numerical simulation model of starting process was established, and the influence of friction torque on starting speed was analyzed. The calculation results show that the friction torque decreases with the increase of engine speed. Under the cold condition, the friction torque increases gradually with the decrease of atmospheric temperature, then the rotating speed decreases in the starting process.

**Key words:** starting; friction resistance moment; numerical simulation; rotating speed; aeroengine

## 0 引言

起动性能是航空发动机总体性能中的重要性能之一,因此,针对起动性能方面的计算尤显重要,计算精度也成为仿真计算的关键。起动过程扭矩特性分析是起动仿真计算的基础,压气机气动扭矩、涡轮输出扭矩和起动机带转扭矩可通过部件试验获得,有经验公式可循;而摩擦阻力矩受发动机冷热态工作条件、单元体结构设计、轴承设计、滑油润滑效果的影响难以确定,缺少经验公式可循。因而,大多数起动仿真模型对摩擦阻力矩不做考虑,影响了计算结果的客观性。

近年来国内外相关科研单位和技术人员借助数值仿真手段对起动性能方面的计算开展过较多研究,发展并完善了相应的起动仿真数学模型,从而以一定精度模拟起动过程参数的变化。例如 Agrawal 等<sup>[1]</sup>采用归纳法建立了燃气涡轮发动机起动过程数学模型,分析了发动机的起动特性;Chappell<sup>[2]</sup>开发了一种实时模型,模拟发动机从起动到停车的整个过程;唐宏刚等<sup>[3]</sup>对涡扇发动机起动和加速过程开展了数值仿真计算,提高了起动性能计算精度;屠秋野等<sup>[4]</sup>利用一种涡扇发动机起动仿真数学模型,对起动过程的控制规律

收稿日期:2019-04-01 基金项目:航空动力基础科研项目资助

作者简介:崔金辉(1987),男,硕士,工程师,主要从事航空发动机总体性能设计工作;E-mail:cjh66hero@163.com。

引用格式:崔金辉,雷杰.航空发动机起动过程摩擦阻力矩计算分析[J].航空发动机,2021,47(1):7-11. CUI Jinhui, LEI Jie. Calculation and analysis of friction resistance moment in aeroengine starting process [J]. Aeroengine, 2021, 47(1): 7-11.

进行分析;周文祥等<sup>[5]</sup>和黄金泉等<sup>[6]</sup>在优化部件特性的基础上,对涡扇发动机高空起动模型进行了研究;王占学等<sup>[7-8]</sup>基于部件匹配技术完成了涡扇发动机起动过程数值模拟,并对起动过程的气动稳定性做了计算;吴虎等<sup>[9]</sup>完善了小转速特性近似方法,基于部件匹配技术建立某型涡扇发动机起动过程计算模型; Marsilio<sup>[10]</sup>和 French<sup>[11]</sup>在高转速部件特性基础上进行外插得到低转速部件特性,进而完成了发动机起动数学模型的建立;杨帆等<sup>[12]</sup>开发了1种起动仿真计算模型,以实际试车数据为基准对模型校对,使计算精度得到较大提高;刘建勋等<sup>[13]</sup>提出了改进部件特性描述方法,有效地解决在低转速区域存在的效率适用性差的问题;朱之丽等<sup>[14]</sup>利用积分方法建立混合排气加力涡扇发动机起动过程模拟模型,计算大气温度、压力及海拔高度等对起动过程的影响;居新星等<sup>[15]</sup>基于级累叠方法和相似原理,得到低转速部件特性,以此建立涡轴发动机起动模型。但以上研究均未考虑摩擦阻力矩对起动性能的影响。

由于摩擦阻力矩存在于发动机各单元体及轴承传动机构上,且温度较低时滑油黏度大、润滑效果差,摩擦阻力矩的影响更明显,仿真计算时不可忽略。为改善起动仿真计算精度,本文重点求解起动过程摩擦阻力矩,对冷、热态条件下摩擦阻力矩计算方法进行研究。

## 1 起动过程分析

航空发动机起动是指发动机转子从转速为0或空中稳定风车加速至慢车状态的过程。发动机地面起动过程转速随时间变化曲线如图1所示。通常将起动过程分为3个阶段:在起动机带动下转速从0增加至点火转速 $n_i$ (点火时间为 $t_i$ )为第1阶段;起动机和涡轮剩余功率二者共同驱动转子加速,直至起动机脱离(脱离转速为 $n_t$ ,脱离时间为 $t_t$ )为第2阶段;起动机脱离后,在涡轮剩余功率的带动下转速从脱离增加至慢车转速 $n_{id}$ (慢车时间为 $t_{id}$ )为第3阶段。

## 2 阻力矩计算方法

### 2.1 计算方法说明

发动机热态阻力矩和冷态阻力矩的计算方

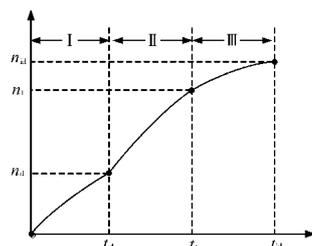


图1 起动过程3个阶段

法不同。在热态条件下,滑油温度高、黏度小,发动机处于最佳工作状态,阻力矩不随温度升高而有明显变化;在冷态条件下,发动机未受热,滑油温度低、黏度大,导致阻力矩偏大,冷态阻力矩的求解需考虑温度的因素。

在热态条件下(本文指发动机进气温度 $T_0 \geq 15$  °C)求解阻力矩,需计算发动机油门杆拉停后转子转速随时间的变化率,从而根据转速变化率与扭矩之间的数学关系得到发动机在慢车转速以下的阻力矩特性。在发动机油门杆拉停后,燃烧室切断供油,不再产生涡轮功,在阻力矩的作用下转子转速逐渐减小,转子转速的变化率反映了发动机阻力矩的大小。采用该方法得到的阻力矩包括发动机所有的摩擦阻力矩和气动阻力矩。在冷态条件下(本文指 $T_0 < 15$  °C)求解阻力矩,通过发动机在低温、不同大气温度条件下冷运转后的转速下降率来完成。选取冷运转试车数据,排除发动机工作磨合时间对滑油温度和滑油黏度的影响。由于冷运转最大转速低于慢车转速,因此在冷态条件下所求得的摩擦阻力矩适用范围仅限于转速为0至冷运转最大转速之间。

### 2.2 热态条件阻力矩计算与分析

以某型发动机为研究对象进行计算分析。选取该发动机热态条件( $T_0=20$  °C)的试车数据,统计在该条件下从油门杆拉停后的转速变化数据,如图2所示。从图中可见,0s为油门杆拉停时刻,纵坐标 $n_H$ 为无量纲化处理的高压转子转速。

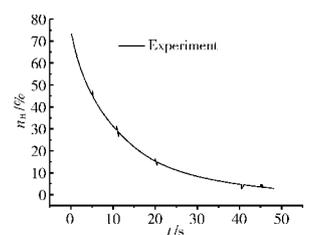


图2 停车后掉转过程  
( $T_0=20$  °C)

在求解转速变化率之前,为降低拟合曲线与试验数据曲线之间的误差,采取分段方式将试验数据曲线拟合成可处理的函数表达式。针对该型发动机,在转速大于14%时采用一元三次函数

$$n_H = -0.0066t^3 + 0.3276t^2 - 6.7722t + 72.35 \quad (1)$$

在转速小于14%时采用指数函数

$$n_H = 47.546e^{-0.058t} \quad (2)$$

将上述分段函数以几何表达方式显示在如图3所示的试车数据曲线。从图中可见,分段函数能很好地逼近试车转速线(试车数据中的坏点已剔除)。

发动机油门杆拉停后,转速变化率与合力矩的数学关系按扭矩平衡方程<sup>[16]</sup>求解为

$$M_{ST}+M_T-M_C/\eta-M_Z=\frac{\pi}{30}J\frac{dn_H}{dt} \quad (3)$$

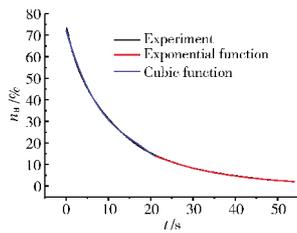


图 3 函数关系式的几何意义

式中: $M_{ST}$ 、 $M_T$ 、 $M_C$ 、 $M_Z$  分别为起动机输出轴扭矩、涡轮剩余扭矩、压气机气动阻力矩、摩擦阻力矩; $J$  为转子转动惯量; $dn_H/dt$  为转速变化率。

发动机拉停后,作用在高压轴上的力矩只有阻力矩,因此式(3)中的  $M_{ST}$  和  $M_T$  均为 0,即发动机转子在总阻力矩( $M_C+M_Z$ )的作用下逐渐减速。摩擦阻力矩没有相应的经验公式可循,而压气机气动阻力矩随转速的增加逐渐增大

$$M_C=A n_H^2 \quad (4)$$

式中: $A$  为与压气机具体型号有关的系数。

对式(1)、(2)求导,可得不同转速段的转速变化率

$$\frac{dn_H}{dt}=-0.0198t^2+0.6552t-6.7722 \quad (5)$$

$$\frac{dn_H}{dt}=-2.758e^{-0.058t} \quad (6)$$

将式(5)、(6)带入式(3)可求解发动机慢车转速以下的总阻力矩,结合式(4)也可求解对应的摩擦阻力矩。

发动机热态起动过程阻力矩计算结果如图 4 所示。纵坐标的阻力矩已做无量纲化处理。从计算结果得出:

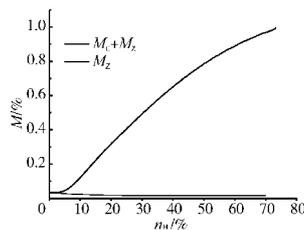


图 4 热态条件下阻力矩

(1) 起动过程总阻力矩随转速的增加逐渐增大;

(2) 摩擦阻力矩随转速的增加逐渐减小,当转速大于 17% 时摩擦阻力矩不再随转速变化而变化;

(3) 在停车状态( $n_H=0%$ )下,由于存在摩擦阻力矩,发动机转子系统总阻力矩不为 0,说明摩擦阻力矩具有系统属性,无法完全消除,只能通过优化结构设计或改善滑油品质而减小。

### 2.3 冷态条件阻力矩计算与分析

冷态起动过程阻力矩的求解方法与热态的相同,差别在于试验数据的选取。冷态起动是指发动机长时

间未工作后的起动,可视为工作日的第 1 次起动。因此,求解冷态条件下起动阻力矩时,需选取在低温天气下发动机冷运转试验的数据,最大限度地排除发动机工作状态、运转时间及初始滑油温度对摩擦阻力矩的影响。

分析该型发动机在低温天气不同大气温度( $T_0=-5$ 、 $-10$ 、 $-15$  °C)下冷运转的试车数据。油门杆拉停时刻记为  $t=0$ ,拉停后发动机转速变化情况如图 5 所示。从图中可见,温度越低,相同时刻的转速越小,即降转速度更快。

同样,当  $T_0=-5$ 、 $-10$ 、 $-15$  °C 时分别推导出逼近 3 条转速下降曲线的函数

$$n_H=-0.0002t^3+0.0221t^2-1.0786t+24.205 \quad (7)$$

$$n_H=-0.0002t^3+0.0213t^2-1.0757t+24.063 \quad (8)$$

$$n_H=-0.0002t^3+0.028t^2-1.2084t+24.533 \quad (9)$$

对以上方程式求导,得出不同温度下的转速下降率

$$\frac{dn_H}{dt}=-0.0006t^2+0.0442t-1.0786 \quad (10)$$

$$\frac{dn_H}{dt}=-0.0006t^2+0.0426t-1.0757 \quad (11)$$

$$\frac{dn_H}{dt}=-0.0006t^2+0.056t-1.2084 \quad (12)$$

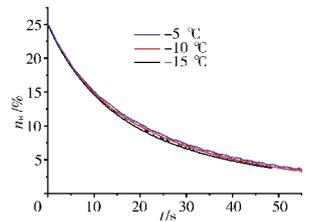


图 5 不同温度下的转速下降

将式(10)~(12)带入式(3)中求解 25% 转速下的总阻力矩;结合式(4)可求解对应的摩擦阻力矩。在发动机冷态条件下阻力矩计算结果如图 6 所示。从计算结果得出:

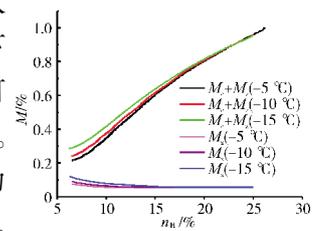


图 6 冷态条件下阻力矩

(1) 当转速较低时,随着温度的降低,在相同转速下的总阻力矩和摩擦阻力矩越来越大,说明温度对冷态起动低转速段阻力矩有明显影响;

(2) 随着转速的增加,摩擦阻力矩逐渐减小,当转速大于 17.5% 时 3 种温度下摩擦阻力矩趋于 1 个相同的固定值,不再受环境温度和转速影响。这是因为发动机转速的加快使转动件磨合程度加大,发动机内部温度升高,导致滑油温度升高、滑油黏度降低,使机械部件之间的摩擦力减小。

### 3 起动过程摩擦阻力矩数学模型的建立

#### 3.1 基本方程

起动过程仿真数学模型的建立主要依据发动机转子扭矩平衡方程(3),对其进行积分求解得到起动时间为

$$t = \frac{\pi}{30} J \times \int \frac{dn}{M_{ST} + M_T - M_C / \eta - M_Z} \quad (13)$$

在计算时,将起动过程的3个阶段划分为多个转速段,步长尽可能小,在每一步长内运用式(13)进行时间求解,直至转速达到要求的慢车转速为止。

#### 3.2 起动时间计算

起动时间的计算可分段或不分段计算。分段计算不仅便于比较每个阶段对整个起动时间的影响,也便于研究特征参数对起动时间的影响<sup>[7]</sup>。因此本文采用分段计算方法。

在起动第1阶段,仅有起动机带转,涡轮未产生功率,起动时间为

$$t_I = \frac{\pi}{30} J \cdot \int_0^{n_a} \frac{dn}{M_{ST} - M_C / \eta - M_Z} \quad (14)$$

在起动第2阶段,主燃烧室点火后,涡轮开始产生功率,起动时间为

$$t_{II} = \frac{\pi}{30} J \cdot \int_{n_a}^{n_i} \frac{dn}{M_{ST} + M_T - M_C / \eta - M_Z} \quad (15)$$

在起动第3阶段,起动机脱开后仅有涡轮驱动转子转动,起动时间为

$$t_{III} = \frac{\pi}{30} J \cdot \int_{n_i}^{n_{id}} \frac{dn}{M_T - M_C / \eta - M_Z} \quad (16)$$

总之,对于慢车转速  $n_{id}$ ,总的起动时间为

$$t = t_I + t_{II} + t_{III} \quad (17)$$

#### 3.3 数学模型的建立和约束条件

联立式(14)~(16),根据已知部件特性约束条件,完成起动过程数学仿真模型的建立,得到起动过程各参数的变化规律,也可根据起动过程特征参数逆向确定起动机扭矩或者发动机部件特性,为发动机部件选型提供约束条件。

部件特性约束条件主要包括:压气机部件试验得到的气动阻力矩/转速特性,主燃烧室稳定点火和工作边界,涡轮部件试验得到的涡轮剩余功率/扭矩/转速特性,冷、热态条件下起动过程阻力矩特性。

发动机起动过程特征参数主要包括:点火转速、点火时间、脱开转速、脱开时间、慢车转速和慢车时间。主燃烧室点火参数主要影响涡轮投入工作的时

机,受主燃烧室稳定工作边界的限制;起动机脱开参数主要反映起动机带转能力,受起动机设计水平的限制;慢车状态参数由发动机性能设计方案决定,受飞机设计输入的限制和发动机加速性要求的制约。

### 4 摩擦阻力矩对起动转速的影响

为分析摩擦阻力矩对起动过程转速的影响,在  $T_0=20^\circ\text{C}$  时分别在有、无摩擦阻力矩2种条件下对起动过程进行数值模拟,并选取该发动机在  $T_0=20^\circ\text{C}$  时的试车数据作对比。

在计算时,将压气机、主燃烧室、涡轮等部件特性带入模型中作为已知约束条件;该发动机采用某空气涡轮起动机,其输出轴扭矩<sup>[18]</sup>为

$$M_{ST} = \frac{30}{\pi} (m_{ST} \frac{k}{k-1} R T_{ST} (1 - \pi_1^{1-k/k}) \eta) / n_{ST} \quad (18)$$

式中:  $m_{ST}$  和  $T_{ST}$  分别为空气涡轮起动机进口空气质量流量和进口空气总温;  $k$  为气体等熵绝热指数,对于空气,  $k=1.4$ ;  $R$  为气体常数;  $\pi_1$  为空气在起动机涡轮中的膨胀比;  $\eta$  为空气涡轮起动机效率;  $n_{ST}$  为起动机输出轴转速。

试验数据和仿真计算结果对比如图7所示。在不考虑摩擦阻力矩时,计算转速曲线整体上是试验数据曲线之上,转速上升较快,起动到慢车的时间约为40 s。在计入摩擦

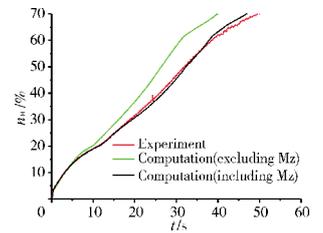


图7 试验数据和仿真数据的差异

阻力矩时,计算的转速上升曲线下移,转速上升变慢,起动时间约为46.9 s,计算转速曲线更加靠近试验转速曲线,在转速小于25%时二者基本重合。因此,进行数值仿真计算时,应该考虑摩擦阻力矩的影响,计算结果更为客观,与试验结果更加接近。另外,在优化发动机起动性能时,若不调整供油,可考虑采用减小摩擦阻力矩以提高转速上升率。

综上所述,仿真计算结果与试车数据吻合度较高,仅在高转速段存在约2%的差异,说明仿真模型较为可靠。

### 5 结论

本文对航空发动机起动过程阻力矩的计算方法进行了研究,完善并建立了仿真计算模型,对仿真结果和试验数据进行了对比分析。得出以下结论:

(1)随着转速的增加,摩擦阻力矩逐渐减小,当转速大于某一值时,摩擦阻力矩不再变化;

(2)冷起动时,发动机进气温度越低,在相同转速下摩擦阻力矩越大;

(3)数学模型计算结果与试验数据吻合度较高,可用于起动过程的仿真计算,为保证结果的客观性应在计算时考虑摩擦阻力矩。

## 6 展望

摩擦阻力矩与发动机自身结构、滑油润滑效果、发动机总工作时间相关,是发动机系统属性,不同型号发动机或同一型号不同批次发动机的摩擦阻力矩均不相同,给工程应用带来很大困难;另外,本文研究未考虑飞机功率提取和引气对起动过程的影响,但由于功率提取和引气一直存在于整个或部分起动过程,后续可继续完善仿真模型、提高计算精度。

### 参考文献:

- [1] Agrawal R K, Yunis M. A generalized mathematical model to estimate gas turbine starting characteristics [R]. ASME 1981-GT-202.
- [2] Chappell M. An approach to modeling continuous turbine engine operation from startup to shutdown[R]. AIAA-91-2373.
- [3] 唐宏刚,蔡元虎. 某型涡扇发动机起动和加速过程数值模拟[J]. 推进技术,2007,28(3):264-268.  
TANG Honggang, CAI Yuanhu. Modeling turbofan engine starting and accelerating condition based on component matching principles [J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(3): 264-268. (in Chinese)
- [4] 屠秋野,唐狄毅. 涡扇发动机起动模型及起动控制规律的研究[J]. 推进技术,1999(2):21-24.  
TU Qiuye, TANG Diyi. Study on startup model and startup control law of turbofan engine [J]. Journal of Propulsion Technology, 1999(2): 21-24. (in Chinese)
- [5] 周文祥,黄金泉. 涡扇发动机高空起动模型研究[J]. 航空动力学报,2007,22(8):1384-1390.  
ZHOU Wenxiang, HUANG Jinquan. Research on the startup model of turbofan engine at high altitude [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(8): 1384-1390. (in Chinese)
- [6] 周文祥,黄金泉,窦建平. 涡扇发动机部件级起动模型[J]. 航空动力学报,2006,21(2):248-253.  
ZHOU Wenxiang, HUANG Jinquan, DOU Jianping. Development of component level startup model for a turbofan engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(2): 248-253. (in Chinese)
- [7] 王占学,乔渭阳,李文兰. 基于部件匹配技术的涡扇发动机起动过程数值模拟[J]. 航空动力学报,2004,19(4):444-448.  
WANG Zhanxue, QIAO Weiyang, LI Wenlan. Modeling turbofan engine startup based on component matching principles [J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(4): 444-448. (in Chinese)
- [8] 王占学,乔渭阳,李文兰. 涡扇发动机起动过程气动稳定性的数值计算[J]. 推进技术,2006,27(3):221-224.  
WANG Zhanxue, QIAO Weiyang, LI Wenlan. Computation and assessment of aerodynamic stability of turbofan engine startup and acceleration [J]. Journal of Propulsion Technology, 2006, 27(3): 221-224. (in Chinese)
- [9] 吴虎,冯维林. 某型涡扇发动机起动过程数值模拟[J]. 航空动力学报,2007,22(12):2068-2072.  
WU Hu, FENG Weilin. Numerical simulation of the startup process of augmented turbofan engines [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(12): 2068-2072. (in Chinese)
- [10] Marsilio R. A computational method for gas turbine engines [R]. AIAA-2005-1009.
- [11] French M W. Development of a compact real-time turbofan engine dynamic simulation[R]. SAE 1982-821401.
- [12] 杨帆,樊丁,彭凯,等. 基于试车数据的航空发动机起动过程建模[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2013,14(16):1-4.  
YANG Fan, FAN Ding, PENG Kai, et al. Modeling of an aero-engine in starting process based on the test data [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2013, 14(16): 1-4. (in Chinese)
- [13] 刘建勋,李应红,张东方. 发动机起动过程部件特性的一种改进描述[J]. 燃气涡轮试验与研究,2007,20(1):13-16.  
LIU Jianxun, LI Yinghong, ZHANG Dongfang. A modified description method for components characteristics of engine starting [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2007, 20(1): 13-16. (in Chinese)
- [14] 朱之丽,高超. 涡扇发动机地面起动过程性能模拟[J]. 北京航空航天大学学报,2006,32(3):280-283.  
ZHU Zhili, GAO Chao. Model for ground starting of turbofan engine [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(3): 280-283. (in Chinese)
- [15] 居新星,张海波,陈浩颖. 一种通用涡轴发动机起动过程建模方法研究[J]. 推进技术,2017,38(6):1386-1394.  
JU Xinxing, ZHANG Haibo, CHEN Haoying. A research on start-up modeling for turbo shaft engines [J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(6): 1386-1394. (in Chinese)
- [16] 骆广琦. 航空燃气涡轮发动机数值仿真[M]. 北京:国防工业出版社,2007:129-131.  
LUO Guangqi. Numerical method for aviation gas turbine engine simulation [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007: 129-131. (in Chinese)
- [17] 苏伟生,孙建国,程蓝,等. 基于扭矩特性的航空发动机起动系统数学模型[J]. 航空动力学报,2005,20(3):499-502.  
SU Weisheng, SUN Jianguo, CHENG Lan, et al. Study on mathematic model of aeroengine starting systems based on moment characteristics [J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(3): 499-502. (in Chinese)
- [18] 总编委会. 航空发动机设计手册(第14册):辅助动力装置及起动机[M]. 北京:航空工业出版社,2001:180-181.  
General Editorial Committee. Aeroengine design manual (volume 14): auxiliary power unit and starter [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2001: 180-181. (in Chinese)

(编辑:贺红井)