

文章编号:1674-8190(2014)01-124-06

一种航空发动机轮盘尺寸与重量预估方法

杨龙龙¹, 陈玉春¹, 樊巍¹, 李维², 刘元轩²

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

(2. 中国航空工业集团 航空动力机械研究所, 株洲 412002)

摘要: 为了在航空发动机总体设计阶段准确快速的预估轮盘转子的重量, 正确把握轮盘结构形式的发展趋势, 建立基于等强度型面的轮盘尺寸设计和重量预估模型并开发计算程序, 利用程序对某型涡扇发动机的轮盘转子进行重量预估, 研究在不同轮盘中心孔半径、不同叶片应力参数(AN^2)值下的轮盘尺寸和重量的变化规律, 研究轮盘重量在不同轮盘中心孔半径、不同 AN^2 值下随转子叶片材料的变化。结果表明: 在满足一定的强度负荷限制和结构限制的条件下, 存在轮盘应力和轮盘中心孔半径的最优组合, 使得轮盘重量最小; 转子叶片采用密度更小的新材料后, 轮盘的中心孔半径增大, 进而可能演化为叶环结构, 转子部件重量大幅下降。

关键词: 航空发动机; 轮盘; 等强度型面; 重量预估; 结构形式

中图分类号: V232.3

文献标识码: A

A Method of Size and Weight Estimation of Aeroengine Disk

Yang Longlong¹, Chen Yuchun¹, Fan Wei¹, Li Wei², Liu Yuanxuan²

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Aviation Powerplant Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Zhuzhou 412002, China)

Abstract: In order to estimate the disk weight quickly and accurately and to grasp the development trend of the disk structure correctly at the conceptual design stage of new aircraft engines, the model based on equal strength profile and corresponding program for evaluation of disk size and weight is set up. A turbofan engine disk is estimated with the program mentioned above. It is studied that the disk size and weight change with the radius of the center bore and the value of AN^2 of the rotor blade. In addition, it is also studied that the disk size and weight change with the replacement of the rotor blade material at different radius of center bore and different values of AN^2 . The results show that there exists an optimum combination of disk stress and the radius of the center bore to get the minimum disk weight under limits of strength load and structure. With the new material of lower density for blade, the radius of the center bore of the disk will increase so that the rotor structure evolves into bling structure, its weight dropped significantly.

Key words: aeroengine; disk; equal strength profile; weight estimation; structure form

0 引言

发动机重量是航空发动机总体设计过程中一个十分重要的参数, 它关系到发动机总体性能的优劣, 并且直接影响飞机性能的先进性, 故在总体设

计阶段, 准确、快速的发动机重量预估显得非常重要。旋转部件是发动机中最重要、负荷最大的部件, 对其轮盘转子的重量预估成为比较重要的问题。而轮盘重量与其结构形式密切相关, 准确把握航空发动机轮盘转子结构形式的发展趋势, 有利于合理地预估未来先进航空发动机轮盘转子的重量。

美国在轮盘转子重量预估模型/软件等方面开展了大量工作, 如 WATE-1、WATE-2、WATE-S^[1-3]等, NASA 将其作为发动机设计的一个重要

环节。以 WATE-1 为例,轮盘的重量预估模型取决于 29 台发动机轮盘重量数据,根据输入的气动、热力、结构等参数计算出流道尺寸,根据叶根应力和材料的屈服应力计算出轮盘重量,但该模型不适用于采用新材料的未来航空发动机轮盘转子。M. T. Tong^[4]对 WATE 中的轮盘重量预估方法进行了改进,以实际轮盘最可能使用的型面为基础,采用有限差分的方法对轮盘转子进行应力分析,在满足一定强度负荷条件下估算出轮盘转子的重量,对 GE-90 等发动机的估算达到了更高的精度。在国内,黄志勇^[5]采用有限元的计算方法,在满足强度要求的条件下,完成了对压气机轮盘转子的重量预估。对于总体设计中快速、简化、准确的轮盘构型和重量估算方面未见报道。上述的国内外方法中,轮盘构型不是通过经验数据进行插值计算,就是采用十分复杂的计算方法,且轮盘中心孔半径是根据经验选取的,在发动机总体设计时难以确定。故在新型发动机总体设计时,如何既能快速有效地进行轮盘构型设计和选取轮盘中心孔的半径,又能准确预估出轮盘转子的重量显得非常重要。

本文根据发动机总体设计中轮盘构型、中心孔半径的确定以及重量预测的需求,综合考虑轮盘转子的强度负荷要求,建立基于等强度型面^[6]的轮盘重量预估模型,研究轮盘重量随其中心孔半径和叶片的叶根应力参数 AN^2 的变化规律,并预测未来航空发动机轮盘转子的结构形式,为未来先进航空发动机的总体设计和轮盘转子结构的初步设计提供有益的参考。

1 模型简介

1.1 几何模型的简化

对于轮盘的设计,J. D. Mattingly 等^[6]提出了考虑离心应力的等强度盘设计概念,等强度设计充分地利用材料,此时轮盘重量是最轻的。考虑到轮盘所处的工作情况,实际轮盘的型面多数是直线、圆弧线、二次曲线等的组合^[7],其轮盘设计总是朝着等强度设计的方向而努力。因此,在发动机总体设计阶段,在保证研究对象计算精度的基础上,对轮盘的几何模型进行一定的简化,即采用等强度型

面的几何构型,其结构示意图如图 1 所示。

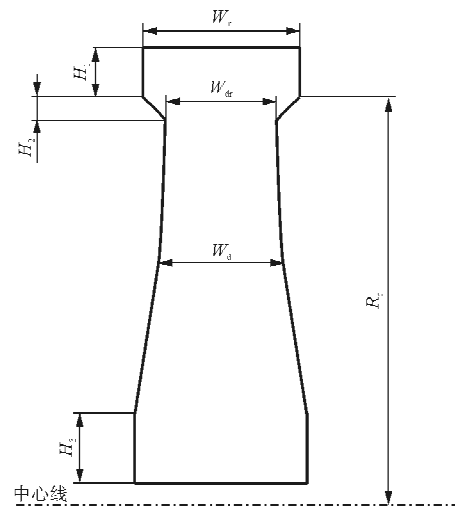


图 1 轮盘结构示意图

Fig. 1 Diagram of disk structure

图 1 中: W_r 为轮缘厚度,约等于叶片的弦长; W_{dr} 为最小轮盘厚度,按经验值选取^[6]; H_1 为外轮缘高度, H_2 为外轮缘与辐板连接段高度; H_3 为内轮缘高度, H_1 、 H_2 、 H_3 按经验值选取^[4]; R_i 为轮缘内沿处半径; W_d 为半径 R 处轮盘辐板的厚度, W_d 按下式关系给出:

$$W_d = W_{dr} \times \exp\{DSF \times [1.0 - (R/R_i)^2]\} \quad (1)$$

式中: DSF 为轮盘形状因子,可表征轮盘辐板的厚度。

1.2 轮盘重量预估模型及方法

本文简化的轮盘重量预估模型由五部分组成:叶片根部榫槽、轮盘外轮缘、轮盘外轮缘与辐板连接段、轮盘辐板以及轮盘内轮缘,轮盘重量为五部分重量之和。叶片根部榫槽的重量与轮盘转子上的叶片重量有关^[4],叶片重量预估模型和其他四部分的重量预估模型详见文献[1]和文献[4],下文介绍具有等强度型面的轮盘辐板的重量预估模型、轮盘强度分析模型、轮盘最小重量中心孔半径的确定方法以及轮盘重要预估方法。

(1) 轮盘辐板重量模型

轮盘辐板厚度随半径的变化关系为

$$W_D = \int_{r_1}^{r_2} \rho_D \cdot 2\pi r \cdot W_d \cdot dr \quad (2)$$

式中: r_1 为轮盘辐板内缘处半径; r_2 为轮盘辐板外缘处半径; ρ_D 为轮盘材料密度。

(2) 强度分析模型

考虑到轮盘所受的载荷(叶片离心载荷、轮盘离心载荷), 可将轮盘简化为轴对称问题来处理^[8]。轮盘的平衡微分方程:

$$\frac{d}{dr}(hr\sigma_r) - h\sigma_\theta + h\rho\omega^2 r^2 = 0 \quad (3)$$

其中,

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{E}{1-\nu^2} \left[\frac{du}{dr} + \nu \frac{u}{r} - (1+\nu)\alpha T \right] \\ \sigma_\theta = \frac{E}{1-\nu^2} \left[\frac{u}{r} + \nu \frac{du}{dr} - (1+\nu)\alpha T \right] \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)代入方程(3), 可得位移分量表示的微分方程:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 u}{dr^2} + \left[\frac{d}{dr}(\ln h) + \frac{1}{r} \right] \frac{du}{dr} + \left[\frac{\nu}{r} \frac{d}{dr}(\ln h) - \frac{1}{r^2} \right] u \\ = (1+\nu)\alpha \left[T \frac{d}{dr}(\ln h) + \frac{dT}{dr} \right] - \frac{\rho\omega^2(1-\nu^2)r}{E} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: u 为半径 r 处的微元体的位移; h 为盘的厚度; ν 为盘材料的泊松比; α 为盘材料的线性膨胀系数; T 为半径 r 处的温度; ρ 为盘材料的密度; E 为盘材料的弹性模量。微分方程(5)的边界条件: 中心孔半径处, 径向应力 $\sigma_r = 0$; 轮缘处, 径向应力 $\sigma_r = \sigma_{rim}$, σ_{rim} 的计算公式详见文献[1]。

(3) 轮盘最小重量中心孔半径的确定方法

轮盘重量 W_{disk} 可以表示为

$$W_{disk} = f(X, DSF, R_{bore}) \quad (6)$$

式中: R_{bore} 为轮盘的中心孔半径; DSF 和 R_{bore} 为本模型的设计变量; X 为轮盘重量计算可以确定的已知参数, 包括轮盘材料密度、轮盘外径、叶片高度、叶片弦长、高压轴外径等。

结构限制准则为轮盘辐板厚度不超过轮盘外径的 $1/3$ ^[4], 强度设计准则为

$$\frac{\sigma_y}{sf \cdot \sigma_e} - 1.0 > 0, \frac{0.47\sigma_{uts}}{\sigma_{avg}} - 1.0 > 0 \quad (7)$$

式中: σ_y 为盘材料的屈服极限; σ_e 为当量应力; sf 为安全系数; σ_{uts} 为盘材料的最大拉应力; σ_{avg} 为轮

盘的平均切向应力。

根据式(6)获取最小 W_{disk} 的方法是: 绘制 W_{disk} 随 DSF 和 R_{bore} 的“地毯图”, 选取轮盘重量最小值对应的 DSF 和 R_{bore} 即可。

(4) 轮盘重量预估方法

首先, 对轮盘的结构尺寸进行预设计, 依据文献[9]的流路尺寸预估模型, 确定轮盘外径、叶片高度、叶片弦长、高压轴外径等尺寸, 并给定轮盘的中心孔半径、轮盘形状因子 DSF 的初值。其次, 确定轮盘强度计算所需的材料参数、强度参数等, 采用有限差分的方法对轮盘进行强度分析, 若满足结构强度的要求, 则进行轮盘重量计算; 若不满足, 增加轮盘辐板厚度(增加 DSF), 再次进行强度分析, 直到满足轮盘的结构强度要求为止。最后, 给中心孔半径一个增量, 重复以上步骤, 直到达到给定的循环次数之后, 找出轮盘重量的最小值。同时, 温度对材料性能的影响、轮盘应力集中等, 通过提高转速、加大负荷的方法来补偿这部分应力。

2 算例与分析

2.1 轮盘重量预估

(1) 轮盘重量预估初始参数

某型发动机高压转子的设计转速为 15 183 r/min, 低压转子的设计转速为 5 380 r/min。风扇增压级转子叶片材料为 Ti6-4, 轮盘材料为 Ti17; 高压压气机转子叶片第 1~3 级材料为 TA-1-1, 第 4~9 级材料为 IN718, 高压压气机轮盘第 1~3 级材料为 Ti17, 第 4~9 级材料为 Rene95; 高压涡轮转子叶片材料为 N5, 高压涡轮轮盘材料为 IN718; 低压涡轮转子叶片的进口材料为 DS200APVS, 出口材料为 Rene77, 轮盘材料为 IN718^[10-12]。

(2) 轮盘最小重量中心孔半径的确定

利用已建立的计算模型和相应的计算程序, 研究在不同轮盘中心孔半径、不同叶片 AN^2 值下 (AN^2 值影响 DSF 的大小) 的轮盘重量 W_{disk} 的变化规律。风扇增压级、高压压气机级、高压涡轮、低压涡轮的各级轮盘重量随中心孔半径的变化趋势如图 2~图 5 所示。

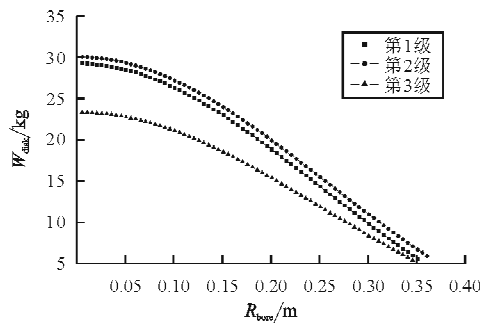
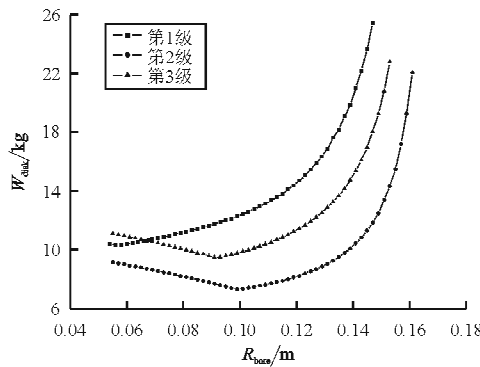
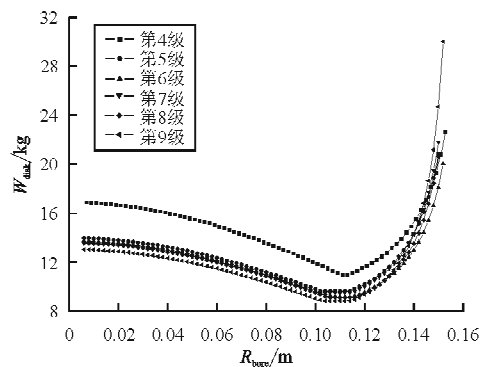


图 2 增压级轮盘重量随中心孔半径的变化

Fig. 2 Changes of booster disk weight with bore radius



(a) 1~3 级



(a) 4~9 级

图 3 高压压气机级轮盘重量随中心孔半径的变化

Fig. 3 Changes of HPC disk weight with bore radius

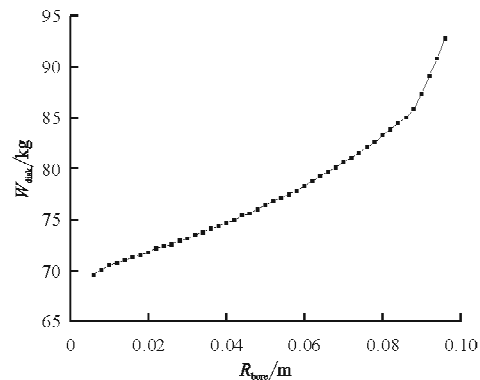


图 4 高压涡轮轮盘重量随中心孔半径的变化

Fig. 4 Changes of HPT disk weight with bore radius

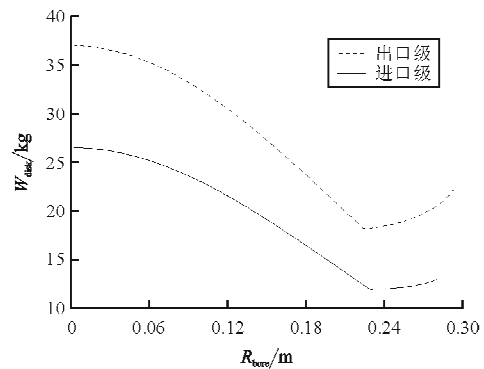


图 5 低压涡轮轮盘重量随中心孔半径的变化

Fig. 5 Changes of LPT disk weight with bore radius

从图 2 可以看出,由于低压转子转速小,负荷较低,风扇增压级的轮盘重量随着中心孔半径的增大而不断减小,表明其叶片的负荷只需叶环结构,即实际低压转子采用鼓式结构承担,故可将轮盘重量最小值对应的中心孔半径作为此风扇增压级轮盘中心孔半径的预估值。

从图 3 和图 5 可以看出,存在一个最佳中心孔半径,使得轮盘的重量最轻。对于负荷不是很大的高压压气机转子和低压涡轮转子,轮盘中心孔半径存在最优值,使得轮盘在满足强度负荷的条件下重量最轻,即实际转子采用盘鼓式结构,开有一定中心孔半径的盘鼓式转子结构是合理的,故可将此最佳中心孔半径作为轮盘中心孔半径的预估值。

而从图 4 可以看出,由于高压涡轮转速高、负荷大,其中心孔半径越大,轮盘重量越重,表明中心孔半径应尽量取较小值以期轮盘重量最轻,这与实际涡轮盘中心孔半径的选取原则是一致的,故可将此高压涡轮轴的外径作为中心孔半径的预估值(满足结构限制的最小孔径)。

(3) 轮盘重量预估结果与分析

由于该型发动机的风扇轮盘转子采用双辐板结构,不适用于本文所建的模型,故未对其进行重量预估。其他转子的轮盘重量预估结果如表 1 和表 2 所示(Model 1 为文献[4]中的模型,Model 2 为本文所建的模型),并与文献[4]中的轮盘重量预估模型所得的轮盘重量进行对比。对比结果表明,除风扇增压级第三级盘、高压压气机第一级盘外,其他级的轮盘重量预估比较准确。增压级第三级的重量误差略大,是因为转子最后一级的鼓筒加一空心轮盘,以改善转子后端的刚性;对于第一级高压压气机转子,鉴于高压转子前轴承的安装位置,

其最佳的中心孔半径比实际轮盘的中心孔半径小,实际轮盘只能增大中心孔半径,增大轮盘厚度。

表 1 两种重量预估模型的结果对比(高压转子)

Table 1 Comparison of estimated weight of model 1 and model 2(high pressure rotor)

高压转子	级数	重量/kg		误差/%
		Model 1	Model 2	
高压压气机	1	14.68	10.35	-29.5
	2	7.93	7.36	-7.2
	3	10.00	9.50	-5.0
	4	10.92	11.01	0.824
	5	9.60	9.68	0.83
	6	9.35	9.23	-1.28
	7	9.31	9.52	2.26
	8	9.14	9.13	-0.109
	9	8.84	8.86	0.226
高压涡轮	1	79.03	80.86	2.32

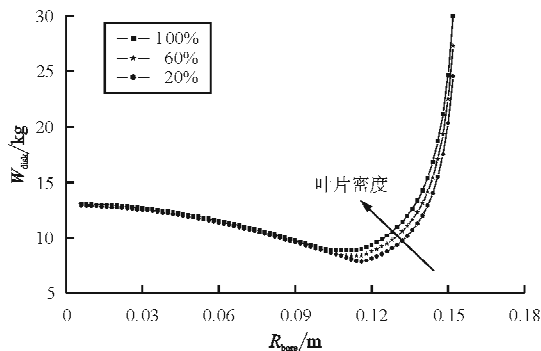
表 2 两种重量预估模型的结果对比(低压转子)

Table 2 Comparison of estimated weight of model 1 and model 2(low pressure rotor)

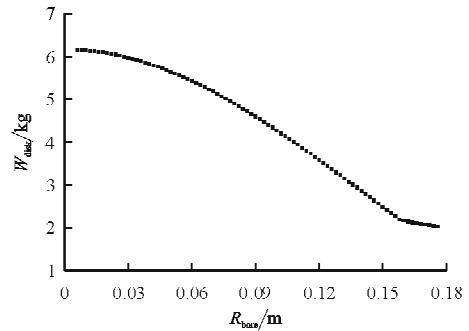
高压转子	级数	重量/kg		误差/%
		Model 1	Model 2	
风扇增压级	1	5.35	5.51	2.99
	2	6.04	5.92	-1.98
	3	7.08	5.45	-23.0
低压涡轮	进口级	12.89	11.92	-7.53
	出口级	18.59	18.13	-2.47

2.2 轮盘结构形式预测

以上文算例中采用的叶片材料为基准(100%密度),在保持高低压转子转速不变的情况下,高压压气机第 9 级、低压涡轮出口、高压涡轮转子叶片材料密度改变后,轮盘转子重量的变化规律,如图 6~图 8 所示。



(a) 改变叶片材料



(b) 改变轮盘材料

图 6 高压压气机第 9 级轮盘重量随中心孔半径的变化

Fig. 6 Changes of HPC disk 9 weight with bore radius

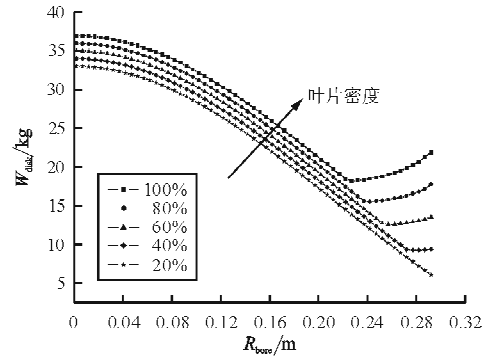


图 7 低压涡轮出口级轮盘重量随中心孔半径的变化

Fig. 7 Changes of LPT exit station disk weight with bore radius

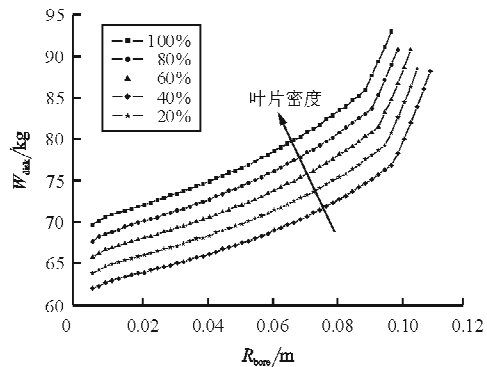


图 8 高压涡轮轮盘重量随中心孔半径的变化

Fig. 8 Changes of HPT disk weight with bore radius

从图 6 和图 7 可以看出:随着叶片材料密度的降低,在相同的转速下,轮盘应力水平降低,重量减轻,高压压气机轮盘重量的最轻点右移(如图 6(a)所示),若轮盘也采用密度小、强度高的复合材料^[18],其轮盘重量会随着中心孔半径的增大而不断减小(如图 6(b)所示),当低压涡轮转子叶片的密度降低 60%左右时,其轮盘重量也会随着中心孔半径的增大而不断减小(如图 7 所示)。若以轮

盘重量最轻为设计目标,高压压气机轮盘转子的空心度会越来越大,并最终趋于无盘结构,其轮盘转子的重量将会减轻将近 75%左右,这一点在美国 IHPDET 计划的压气机整体叶环结构^[10]的设计中得到了验证;低压涡轮轮盘转子的结构同样会趋向无盘鼓筒型转子,其轮盘转子的重量将会减轻将近 50%左右。

从图 8 可以看出:对于转速大、负荷高、工作环境恶劣的高压涡轮转子,即使采用密度较小的叶片材料,其轮盘重量只会因轮缘处的径向负荷降低而减小,但不会改变其变化趋势,故其轮盘转子的结构不会有太大改变。若要减轻其重量,双辐板盘^[14]是一个发展趋势。

3 结 论

(1) 基于等强度型面的轮盘重量预估模型准确合理,但不可用于具有特殊型面轮盘(如双辐板盘)的重量预估。

(2) 在满足一定的强度负荷下,轮盘转子的重量随中心孔半径的变化呈现一定的变化规律。对于强度负荷不大的转子,存在一个最佳中心孔半径,使得轮盘的重量最轻,对于强度负荷较大的转子,中心孔半径应尽可能取较小值以期轮盘重量最轻。

(3) 从最小轮盘重量的角度对轮盘转子结构的预测,可以为未来先进航空发动机的总体设计和轮盘转子结构的初步设计提供有益的参考。

(4) 本文提出的模型可以方便地应用于发动机方案设计阶段的总体设计中轮盘的尺寸与重量设计预测。

参考文献

- [1] Pera R J, Onat E, Klees G W, et al. A method to estimate weight and dimensions of aircraft gas turbine engines[R]. NASA CR-135170, 1977.
- [2] Onat E, Klees G W. A method to estimate weight and dimensions of large and small gas turbine engines[R]. NASA 79-21295, 1979.
- [3] Hale P L. A method to estimate weight and dimensions of small aircraft propulsion gas turbine engines[R]. AIAA-82-23037, 1982.
- [4] Tong M T. A computer code for gas turbine engine weight and disk life estimation[J]. ASME 2002-GT-30500, 2002.
- [5] 黄志勇. 航空发动机压气机转子重量预估方法研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2004, 17(4): 24-26.

- [6] Huang Zhiyong. An investigation on prediction methods of aeroengine compressor rotor weight[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2004, 17(4): 24-26. (in Chinese)
- [6] Mattingly J D, Heiser W H. Aircraft engine design[M]. USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2002.
- [7] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册: 第 10 册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001. General Editorial Board of *Design Manual of Aero Turbo-engine*. Design manual of aero turbo-engine; No. 10[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [8] 吕文林. 航空发动机强度计算[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993. Lü Wenlin. Strength calculation of aero engine[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1993. (in Chinese)
- [9] Sanghi V, Kumar K, Sundararajan V. Preliminary estimation of engine gas-flow-path size and weight[J]. Journal of Propulsion and Power, 1998, 14(2): 208-214.
- [10] 陈光. 航空发动机结构设计分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006. Chen Guang. Structure design of aero engine[M]. Beijing: Beihang University Press, 2006. (in Chinese)
- [11] 方昌德. 世界航空发动机手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 1996. Fang Changde. World aviation engine manual[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1996. (in Chinese)
- [12] 《中国航空材料手册》编委员会. 中国航空材料手册: 第 2 册, 第 4 册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001. Editorial Board of *China Aeronautical Materials Handbook*. China aeronautical materials handbook; No. 2 and No. 4 [M]. Beijing: China Standard Press, 2001. (in Chinese)
- [13] 沃丁柱. 复合材料大全[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000. Wo Dingzhu. Complete dictionary of composites[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000. (in Chinese)
- [14] 江和甫. 对涡轮盘材料的需求及展望[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2002, 15(4): 1-6. Jiang Hefu. Requirements and forecast of turbine disk materials[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2002, 15(4): 1-6.

作者简介:

杨龙龙(1989—)男,硕士研究生。主要研究方向:航空宇航推进理论与工程。

陈玉春(1967—)男,教授,博导。主要研究方向:航空宇航推进理论与工程。

樊巍(1989—)男,硕士研究生。主要研究方向:航空宇航推进理论与工程。

李维(1973—)男,博士,研究员。主要研究方向:航空发动机叶轮机气动设计。

刘元轩(1965—)男,博士,研究员。主要研究方向:航空发动机总体结构设计。

(编辑:赵毓梅)