

# 增压器涡轮叶轮极端载荷下动态可靠性模型<sup>\*</sup>

王正 王增全 郭凯 邓春龙

(中国北方发动机研究所柴油机高增压技术国防重点实验室,大同 037036)

**【摘要】** 分析了叶片单元数与载荷作用次数对涡轮叶轮可靠性的影响,建立了极端载荷作用下增压器涡轮叶轮的动态可靠性模型与失效率计算模型。分析了涡轮叶轮的结构特点,建立了能体现叶片数影响的涡轮叶轮强度概率分布函数。针对增压器涡轮叶轮由超速这种极端载荷所引起的失效模式,以载荷作用次数为寿命度量指标,建立了能体现叶片单元数、载荷、强度以及工作循环次数影响的涡轮叶轮可靠性模型、失效率计算模型以及平均寿命模型。以某型增压器为例,研究了涡轮叶轮可靠度与失效率随工作循环次数的变化规律。研究表明:随着工作循环次数的增加,涡轮叶轮的可靠度逐渐降低,失效率逐渐减小且趋于一个稳定值。与传统方法相比,所建模型可以更加准确地对涡轮叶轮的可靠性进行分析与评价。

**关键词:** 增压器 涡轮叶轮 叶片数 可靠性 失效率 极端载荷

**中图分类号:** TB114.3; TK413.5+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)07-0032-04

## Dynamic Reliability Model of Turbine Impeller of Turbocharger under Ultimate Load

Wang Zheng Wang Zengquan Guo Kai Deng Chunlong

(National Key Laboratory of Diesel Engine Turbocharging Technology, China North Engine Research Institute, Datong 037036, China)

### Abstract

The effect of the number of blades and load application on the reliability of turbine impeller was studied, and the reliability and failure rate models of turbine impeller of turbocharger under ultimate load were developed. The structural characteristics of turbine impeller were analyzed, and the probability distribution function of strength of turbine impeller capable of reflecting the effect of the number of blades was derived. For the failure mode caused by the ultimate load of over speed, the models of reliability, failure rate and mean life of turbine impeller were developed, which could embody the effect of the number of blades, load, strength and the operating cycles. Taking a turbocharger as an example, the behavior of the reliability and failure rate of turbine impeller changing as the number of operating cycles was studied. The results showed that as the number of operating cycle increased, the reliability of turbine impeller decreased, and the failure rate also decreased and approached to a stable value. Compared with the conventional methods, the models proposed can be applied to analyze and calculate the reliability of turbine impeller more scientifically.

**Key words** Turbocharger, Turbine impeller, Number of blades, Reliability, Failure rate, Ultimate load

### 引言

增压器作为柴油机的关键组成部件,对柴油机整机性能的发 挥起着极为重要的作用。涡轮叶轮作

为涡轮增压器最为核心的零部件,其可靠性在很大程度上决定着增压器的可靠性。在涡轮叶轮的设计中,既要使涡轮叶轮在正常的载荷环境下能够满足规定的性能要求,又要保证涡轮叶轮在承受短暂的

收稿日期:2010-09-02 修回日期:2010-12-12

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(50905007)、国防科技重点实验室基金资助项目(9140C3306131001)和中国博士后科学基金特别资助项目(200902042)

作者简介:王正,副研究员,博士,主要从事机械系统可靠性、柴油机可靠性和高增压技术研究,E-mail:wzneu@126.com

极端载荷作用时不发生失效。

多年来,国内外学者从不同角度对叶轮结构的可靠性进行了研究<sup>[1-3]</sup>。然而,现有的叶轮结构可靠性模型,大多针对叶轮上某一危险部位或应力最大点进行可靠性分析与计算,并以此作为叶轮的可靠度。显然,这类可靠性模型并不能很好地反映叶轮结构特征对其可靠性的影响,最明显的表现之一便是无法体现叶片数不同对叶轮可靠性的影响。同时,现有针对叶轮结构的可靠性模型,大多直接运用传统的应力-强度干涉模型进行叶轮可靠性分析与计算,不能很好地体现可靠性随寿命指标的变化<sup>[1-7]</sup>,也无法根据应力分布与强度分布计算得到叶轮的失效率与平均寿命。本文将考虑增压器涡轮叶轮的结构特点对其可靠性的影响,建立能体现叶片数影响的涡轮叶轮强度累积分布函数与概率密度函数。在此基础上,针对由极端载荷作用引起的失效模式,建立涡轮叶轮的可靠性模型、失效率模型以及平均寿命模型;并以某型增压器为例,研究涡轮叶轮可靠度与失效率随工作循环次数的变化规律。

## 1 涡轮叶轮的强度及其概率分布

涡轮叶轮是将发动机废气能量转换为增压器压气机工作所需机械功的核心部件,由若干叶片单元组成,在结构上具有明显的对称性,是典型的旋转对称结构,如图1所示。由于结构上的对称性,可以认为增压器涡轮叶轮各叶片具有相同的强度概率分布,并且在工作过程中承受着相同载荷。

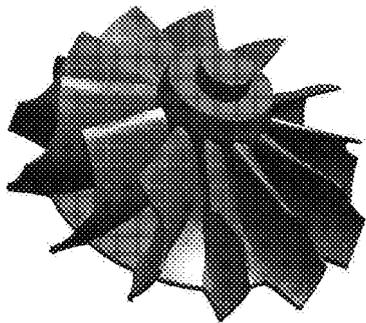


图1 典型的涡轮增压器涡轮叶轮

Fig.1 Typical turbine impeller of turbocharger

对于像增压器涡轮叶轮这类旋转对称结构,每个对称单元的危險部位都有可能成为实际的失效部位。从统计学角度来看,涡轮叶轮的叶片单元可以视为从服从某一强度概率分布的母体中抽取的一个随机样本,涡轮叶轮可视为由这些样本所组成的一个样本集,样本数等于涡轮叶轮的叶片数。显然,对于同一载荷,只要样本集中的最小值能抵抗该载荷,则其他样本也均能抵抗该载荷。也就是说,只要涡轮叶轮中强度最小的叶片单元在某一载荷作用下不

发生失效,则涡轮叶轮在这一载荷作用下就是可靠的。因此,可以将叶片单元中的最小强度作为涡轮叶轮的强度。

设每个叶片的强度概率密度函数和累积分布函数分别为 $f_i(\delta)$ 和 $F_i(\delta)$ ,对于叶片数为 $n$ 的增压器涡轮叶轮,涡轮叶轮的强度即为由样本数为 $n$ 的样本集所确定的最小顺序统计量。因此,叶片数为 $n$ 的涡轮叶轮强度累积分布函数可表示为<sup>[8]</sup>

$$F_T(\delta) = 1 - (1 - F_i(\delta))^n \quad (1)$$

概率密度函数可表示为

$$f_T(\delta) = n(1 - F_i(\delta))^{n-1}f_i(\delta) \quad (2)$$

式(1)和式(2)所示的涡轮叶轮强度概率分布函数中包含了叶片数,能够体现叶片数对涡轮叶轮强度概率分布的影响。

例如,叶片强度服从均值为1000 MPa,标准差为50 MPa的正态分布,涡轮叶轮强度概率密度函数随叶片数( $n=1, 10, 15, 25$ )的变化如图2所示。

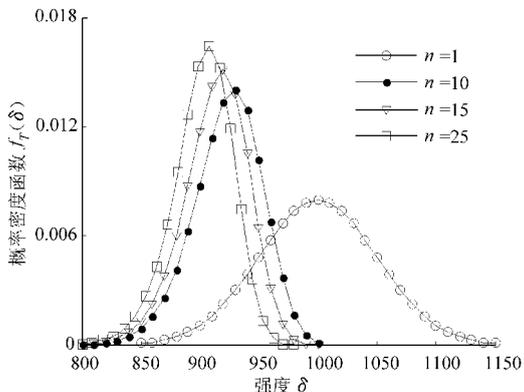


图2 涡轮叶轮强度概率密度函数随叶片数的变化曲线

Fig.2 Curves of strength probability density function of turbine impellers with different blades

从图2中可以看出,叶片数对涡轮叶轮强度概率分布的影响较大;对于具有同一强度概率分布的叶片,涡轮叶轮强度概率分布的均值随叶片数的增加而降低,其分散性随叶片数的增加而减小。

## 2 极端载荷作用下的涡轮叶轮可靠性建模

增压器涡轮叶轮在与发动机的联合运行过程中普遍承受着随机载荷。即使在发动机台架上进行试验,对应发动机的每一次工作循环即“启动-运转-停车”,增压器涡轮叶轮所经历的最大载荷也不尽相同;对于在实际中使用的增压器涡轮叶轮,其经历的最大载荷分散性则更大。

将针对增压器涡轮叶轮在发动机每一次工作循环过程中由最大载荷所引起的超速破坏这种失效模式,建立极端载荷作用下的增压器涡轮叶轮可靠性模型与失效率计算模型。由于涡轮叶轮在极端载荷

作用下的失效模式所对应强度指标为涡轮叶轮的极限强度,因此,在建模过程中将不考虑强度退化对涡轮叶轮可靠度与失效率的影响。

增压器涡轮叶轮在发动机每一次“启动-运转-停车”的工作循环过程中,都会承受一次最大的载荷;因此,可以将涡轮叶轮在每次这样的工作循环过程中承受的最大载荷视为极端载荷对涡轮叶轮的一次作用。显然,在其全生命周期过程中,涡轮叶轮所经历的这种极端载荷作用是反复多次的,且极端载荷具有较大的分散性。在这里,用概率分布(其累积分布函数和概率密度函数分别为  $F_s(s)$  和  $f_s(s)$ ) 来描述极端载荷的这种不确定性。

当极端载荷对涡轮叶轮作用  $w$  次时,由文献[9]可知,其等效载荷的累积分布函数可表示为

$$F_w(s) = (F_s(s))^w \quad (3)$$

概率密度函数可表示为

$$f_w(s) = w(F_s(s))^{w-1}f_s(s) \quad (4)$$

结合式(1)和式(2),根据载荷-强度干涉理论可得,增压器涡轮叶轮在极端载荷作用  $w$  次时的可靠度可表示为

$$R_T(w) = \int_0^\infty n[1 - F_i(\delta)]^{n-1}f_i(\delta)[F_s(\delta)]^w d\delta \quad (5)$$

根据文献[10]可知,当总的载荷作用次数相对较大时,在以载荷作用次数为寿命度量指标框架下产品的可靠度与失效率的关系为

$$h(w) = \frac{R(w) - R(w+1)}{R(w)} \quad (6)$$

进一步,可以得到增压器涡轮叶轮在极端载荷作用  $w$  次时的失效率计算模型为

$$h_T(w) =$$

$$\frac{\int_0^\infty n(1 - F_i(\delta))^{n-1}f_i(\delta)(F_s(\delta))^w(1 - F_s(\delta)) d\delta}{\int_0^\infty n(1 - F_i(\delta))^{n-1}f_i(\delta)(F_s(\delta))^w d\delta} \quad (7)$$

同时,可以得到在以极端载荷作用次数为寿命度量指标时增压器涡轮叶轮的寿命为

$$\theta_w = \sum_{w=1}^\infty w \int_0^\infty n(1 - F_i(\delta))^{n-1}f_i(\delta)(F_s(\delta))^w d\delta \quad (8)$$

显然,式(5)、(7)和式(8)都包含了涡轮叶片数和极端载荷作用次数,能够科学地体现极端载荷作用下叶片数与载荷作用次数对增压器涡轮叶轮可靠度、失效率以及平均寿命的影响。

### 3 实例

涡轮叶轮结构如图1所示,叶片数为12,材料为镍基铸造高温合金 K418。由于材料 K418 的力学性能随温度变化不大且经实测该涡轮叶轮在最高转速时的温度在 600℃ 左右,这里以 600℃ 时材料的强度作为计算值。强度  $\sigma_b$  分散性用正态分布描述,材料 K418 在 600℃ 时强度  $\sigma_b$  均值为 1 040.55 MPa<sup>[11]</sup>, 取变异系数为 0.05, 强度  $\sigma_b$  标准差为 50.027 5 MPa。

通过对发动机在 30 次“启动-运转-停车”工作循环过程中增压器涡轮叶轮所经历的最高转速进行实测与统计分析,涡轮叶轮的最高转速基本上符合均值为 84 070 r/min, 标准差为 4 155.24 r/min 的正态分布。通过有限元计算(涡轮叶轮的有限元网格模型和叶片单元在某转速时的应力云图分别如图 3 和图 4 所示)和对计算结果的统计分析,对应增压器在这 30 次工作循环所分别经历的最高转速,涡轮叶轮的应力基本上符合均值为 702.561 6 MPa, 标准差为 67.104 MPa 的正态分布。

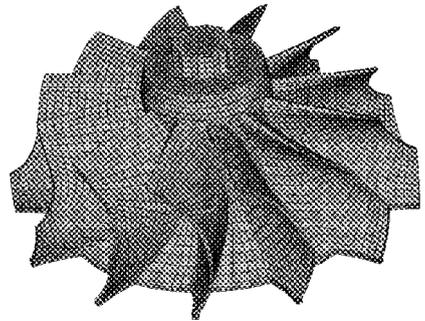


图3 涡轮叶轮的有限元网格模型

Fig.3 Finite element model of turbine impeller

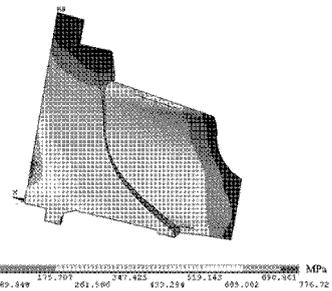


图4 涡轮叶轮叶片单元在某转速时的应力云图

Fig.4 Stress contour of turbine impeller of turbocharger

将上述得到的涡轮叶轮应力与强度分布参数分别代入式(5)和式(7),便可获得增压器涡轮叶轮可靠度与失效率随工作循环次数的变化规律,分别如图 5 和图 6 所示。

图 5 和图 6 中可以看出,对于增压器涡轮叶轮由转速过高这种极端载荷所引起的失效模式,涡轮叶轮的可靠度随着工作循环次数增加而逐渐降低,

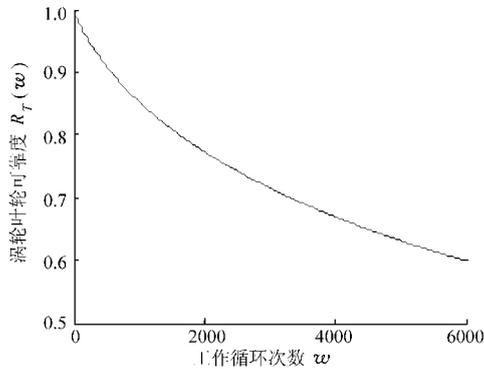


图5 增压器涡轮叶轮可靠度随工作循环次数的变化  
Fig. 5 Relationship between reliability of turbine impeller and the number of operation cycles

失效率随着工作循环次数增加而逐渐减小且趋于一个稳定值。按照传统的方法,如果不考虑工作循环次数对可靠性的影响,涡轮叶轮的可靠度为0.9997;如果同时不考虑叶片数和工作循环次数对可靠性的影响,涡轮叶轮的可靠度接近于1。与本文方法相比,用传统方法计算得到的涡轮叶轮可靠度是偏于危险的。同时,由于传统方法计算得到的可靠度为一确定值,没有很好地反映可靠性的寿命特征,也无法得到涡轮叶轮的失效率。

## 4 结论

(1) 针对增压器涡轮叶轮由其转速过高所引起的超速破坏这种失效模式,建立了增压器涡轮叶轮的动态可靠性模型与失效率计算模型。分析了涡轮叶轮的结构与失效特点,建立了能体现叶片数影响的涡轮叶轮强度概率分布。在此基础上,以极端载

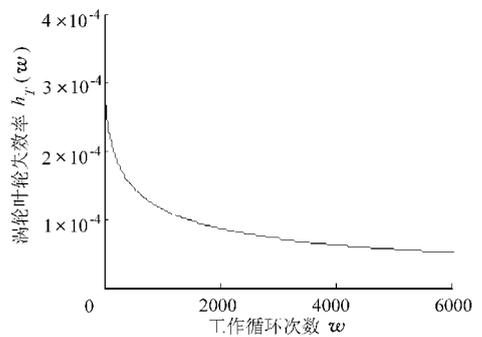


图6 增压器涡轮叶轮失效率随工作循环次数的变化  
Fig. 6 Relationship between failure rate of turbine impeller and the number of operation cycles

荷作用次数为寿命度量指标,建立了增压器涡轮叶轮的可靠性模型、失效率计算模型以及平均寿命模型。以某型涡轮增压器为例,结合实测数据与有限元分析结果,研究了涡轮叶轮可靠度与失效率随增压器工作循环次数的变化规律。研究表明:在最大转速这种极端载荷作用下,增压器涡轮叶轮的可靠度随着工作循环次数增加而逐渐降低,失效率随着工作循环次数增加而逐渐减小且趋于一个稳定值。与本文方法及模型相比,传统的方法由于没有考虑涡轮叶轮的结构特点对其可靠性的影响,计算得到的可靠度偏于危险。

(2) 所建立的极端载荷作用下的涡轮叶轮可靠性模型与失效率计算模型能够科学地体现叶片单元数、载荷、强度以及工作循环次数对涡轮叶轮可靠度与失效率的影响,运用本文模型可以更加准确地对增压器涡轮叶轮的可靠性进行分析与评价。

## 参 考 文 献

- 1 Knut O Ronold, Gunner C Larsen. Reliability-based design of wind-turbine rotor blades against failure in ultimate loading [J]. *Engineering Structures*, 2000, 22(6): 565 ~ 574.
- 2 张虹, 马朝臣. 车用涡轮增压器压气机叶轮强度计算与分析[J]. *内燃机工程*, 2007, 28(1): 62 ~ 66.  
Zhang Hong, Ma Chaochen. Structure computation and analysis of vehicle turbocharger compressor impeller [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2007, 28(1): 62 ~ 66. (in Chinese)
- 3 陈晓伟, 朱梅林, 徐凯, 等. 涡轮增压器压气机叶片静强度可靠性分析[J]. *华中理工大学学报*, 1999, 27(11): 51 ~ 52, 55.  
Chen Xiaowei, Zhu Meilin, Xu Kai, et al. A new approach to calculate safety index of the ICE components [J]. *Journal of Huazhong University of Science & Technology*, 1999, 27(11): 51 ~ 52, 55. (in Chinese)
- 4 Wang Zheng, Xie Liyang. Dynamic reliability model of components under random load [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2008, 57(3): 474 ~ 479.
- 5 Cazuguel M, Renaud C, Cognard J Y. Time-variant reliability of nonlinear structures: application to a representative part of a plate floor [J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 2006, 22(1): 101 ~ 108.
- 6 An Zongwen, Huang Hongzhong, Liu Yu. A discrete stress-strength interference model based on universal generating function [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2008, 93(10): 1485 ~ 1490.

- the volute[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1999, 121(3): 621~626.
- 3 Dazin A, Charley J, Bois G, et al. Pressure fluctuations in the suction and delivery pipes and in the volute of a radial flow pump in non-cavitating and cavitating operating conditions [C] // Proceedings of the ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting. New York: ASME, 2003: 331~338.
  - 4 丛国辉. 双吸离心泵站水力稳定性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2007.  
Cong Guohui. Study on hydraulic stability of double-suction centrifugal pump station [D]. Beijing: China Agricultural University, 2007. (in Chinese)
  - 5 杨敏, 闵思明, 王福军. 双蜗壳泵的压力脉动特性及叶轮径向力数值研究[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11): 83~85.  
Yang Min, Min Siming, Wang Fujun. Numerical simulation of pressure fluctuation and radial force in a double volute pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11): 83~85. (in Chinese)
  - 6 徐朝晖, 吴玉林, 陈乃祥, 等. 基于滑移网格与 RNG 湍流模型计算泵内的动静干扰[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(1): 66~68.  
Xu Zhaohui, Wu Yulin, Chen Naixiang, et al. Simulation of turbulent flow in pump based on sliding mesh and RNG  $k-\epsilon$  model [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(1): 66~68. (in Chinese)
  - 7 Arndt N, Acosta A J, Brennen C E. Experimental investigation of rotor-stator interaction in a centrifugal pump with several vaned diffusers [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1990, 112(1): 98~108.
  - 8 Shi F, Takamoto H. Numerical studies of effects of flow rate and radial gap on pressure fluctuations downstream of a diffuser pump impeller [C] // Proceedings of the 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, 1999: 18~23.
  - 9 Shi F, Takamoto H. Numerical studies of pressure fluctuations caused by impeller-diffuser interaction in a diffuser pump stage [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2001, 123(3): 466~474.
  - 10 王福军. 计算流体动力学分析—CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
  - 11 Spence R, Amaral-Teixeira J. Investigation into pressure pulsations in a centrifugal pump using numerical methods supported by industrial test [J]. Computers & Fluids, 2008, 37(6): 690~704.
  - 12 Alireza Z. Pump-turbine rotor-stator interactions in generating mode: pressure fluctuation in distributor channel [C] // Proceedings of the 23rd IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Yokohama, 2006.
  - 13 Jose G, Carlos S, Eduardo B, et al. Unsteady flow structure on a centrifugal pump: experimental and numerical approaches [C] // Proceedings of 2002 Joint US-European Fluids Engineering Summer Conference, Montreal, 2002.
  - 14 Chu S, Dong R, Katz J. Relationship between unsteady flow, pressure fluctuations and noise in a centrifugal pump—part A: use of PDV data to compute the pressure field [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1995, 117(1): 24~29.
  - 15 朱荣生, 苏保稳, 杨爱玲, 等. 离心泵压力脉动特性分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 43~47.  
Zhu Rongsheng, Su Baowen, Yang Ailing, et al. Numerical investigation of unsteady pressure fluctuations in centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 43~47. (in Chinese)
  - 16 施卫东, 冷洪飞, 张德胜, 等. 轴流泵内部流场压力脉动性能预测与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(5): 44~48.  
Shi Weidong, Leng Hongfei, Zhang Desheng, et al. Performance prediction and experiment for pressure fluctuation of interior flow in axial-flow pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 44~48. (in Chinese)

(上接第 35 页)

- 7 张义民. 任意分布参数的机械零件的可靠性灵敏度设计[J]. 机械工程学报, 2004, 40(8): 100~105.  
Zhang Yimin. Reliability sensitivity design for mechanical elements with arbitrary distribution parameters [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(8): 100~105. (in Chinese)
- 8 茆诗松, 王静龙, 濮晓龙. 高等数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- 9 王正. 零部件与系统动态可靠性建模理论与方法[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.  
Wang Zheng. Theory and method for time-dependent reliability models of components and systems [D]. Shenyang: Northeastern University, 2008. (in Chinese)
- 10 王正. 基于载荷-强度干涉的零件与系统失效率计算方法[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2010.  
Wang Zheng. Method for calculating failure rate of components and systems based on load-strength interference [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- 11 张均享. 高机动性运载车辆动力系统[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2000.