

单圆盘转子的振动可靠性分析

徐自力 夏松波 (哈尔滨工业大学)

杜秀杰 (哈尔滨汽轮机厂)

[摘要]本文介绍了单圆盘转子体系振动响应的计算公式。导出了与振动破坏模式相对应的转子体系的可靠性安全裕量方程,建立了单圆盘转子体系振动可靠性计算数学模型。并讨论了各参数变化对转子振动可靠性的影响。最后给出一个算例说明了该方法的可用性。

关键词 单圆盘转子 可靠性

分类号 TK26.61

0 引言

转子是汽轮机、发电机等旋转机械的一个核心部件,其过大的振动会给设备和人员造成危害。因此提高转子固有可靠性和运行可靠性这一问题受到了设计和运行工程师们的关注,工程上要求对转子的可靠性有一个明确的指标。可靠性工程从二次世界大战诞生后,已在工程领域中得到了广泛应用。然而结构体系振动可靠性仍然是可靠性工程中一个新的分支,公开发表的涉及结构体系振动可靠性的文献非常少见,只是在随机振动方面或可靠性初步探讨方面,有过一些论著^{[1]~[3]}。有关转子体系振动可靠性的文献就更为少见。为此,作者针对单圆盘转子从理论上作了以下几个方面探讨:1、单圆盘转子振动可靠性安全裕量方程建立;2、单圆盘转子振动可靠性计算数学模型建立;3、应用算例。

本文方法能作为单盘转子设计的依据,也可作为多盘转子可靠性研究的基础。

1 单圆盘转子体系的振动响应计算

在高速旋转机械中,偏心质量产生的惯性力是主要的激励来源。因此本节着重讨论转子重心和转轴形心不重合情况下,即具有偏心质量情形的转子振动响应。

如图1a单圆盘转子系统,假设轴两端简支,轴的质量不计,质量为 m 的圆盘固定在轴的中间,图1b为圆盘的俯视图, C 为圆盘的质心, D 为圆盘的形心, O 为旋转中心, $CD=e$ 偏心距;设圆盘静止时,形心与旋转中心重合。

由文献^{[4],[5]}得到如图1所示的单盘转子转轴中心的响应为:

$$Z = |A|e^{i(\omega t - \psi)}$$

收稿日期 1993-11-26

本文联系人 徐自力 男 27 博士研究生 150001 哈尔滨工业大学动力系

其中:

$$|A| = \frac{e\lambda^2}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}}$$

称之为振幅

$$\beta_v = |A|/e = \frac{\lambda^2}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}}$$

称之为

振幅放大系数

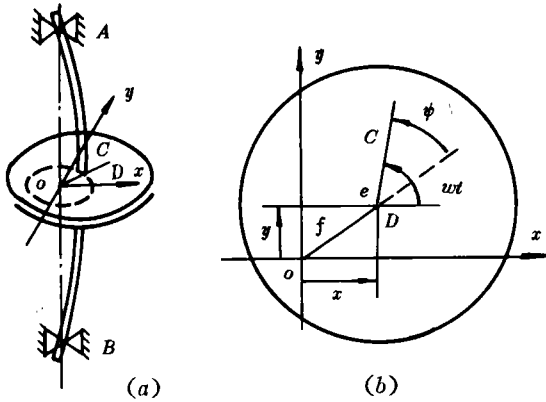


图 1

2 单圆盘转子振动可靠性安全裕量方程

2.1 常规的转子设计准则

目前对转子振动问题,其设计准则为最大振幅不超过许可振幅 A^* ,在应用和计算时经常采用无因次量即振幅放大系数

$$\beta_v = |A|/e$$

其对应设计准则为下述不等式

$$\beta_v < \beta_v^*$$

也即对应的振动设计准则为:

$$\lambda < \lambda_u \text{ 或 } \lambda > \lambda_l$$

其中 λ_u 和 λ_l 分别称为 λ 的上边界和下边界。

对几种典型许可振幅放大系数值和几种典型阻尼值,其对应的频率比上、下边界值通过编程计算列于表 1

表 1 单圆盘转子的 λ_l 和 λ_u 值

	$\zeta = 0.05$	$\zeta = 0.10$	$\zeta = 0.15$	$\zeta = 0.20$	$\zeta = 0.25$
β_v^*	$\lambda_l \sim \lambda_u$	$\lambda_l \sim \lambda_u$	$\lambda_l \sim \lambda_u$	$\lambda_l \sim \lambda_u$	$\lambda_l \sim \lambda_u$
2.0	0.821 ~ 1.407	0.834 ~ 1.385	0.858 ~ 1.345	0.901 ~ 1.281	1.00 ~ 1.155
3.0	0.873 ~ 1.215	0.895 ~ 1.185	0.950 ~ 1.116		
5.0	0.925 ~ 1.103	1.000 ~ 1.021			

在某些强度和振动设计规范中,规定涉及振动的设计安全系数分别选为 2、3、5、假设应力和应变之间及位移与外力之间均存在线性关系,则相应 β_v^* 值应该为 2、3、5,其对应的 λ_l 和 λ_u 值可在表 1 中查出。

2.2 安全裕量方程建立

由于刚性转子和柔性转子的振动特点不同,因此其安全裕量方程也有所不同。下面分两种情况进行讨论。

2.2.1 刚性转子

转子的工作转速小于其一阶固有频率,

则该转子称为刚性转子。此时条件为:

$$U_\omega > U_\Omega \text{ 或 } U_\lambda < 1$$

式中: $U_\omega, U_\Omega, U_\lambda$ 分别为随机变量 ω, Ω, λ 的均值

通常 ζ 值很小为一种欠阻尼状态 ($\omega_n = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$),故 ω_n/ω 接近于 1,即有阻尼固有频率 ω_d 非常接近无阻尼固有频率 ω ,因此仅讨论频率比 λ 。

在 $U_\lambda < 1$ 条件下设计准则应为:

$$\Omega/\omega < \lambda_l$$

式中: Ω, ω 为随机变量, λ_l 为规定值。

因此单圆盘刚性转子体系可靠性安全裕量方程为

$$\begin{aligned}\omega - \Omega/\lambda_L > 0 & \quad \text{安全} \\ \omega - \Omega/\lambda_L \leq 0 & \quad \text{不安全}\end{aligned}$$

可靠性安全边界方程为:

$$\omega - \Omega/\lambda_L = 0$$

如果用符号 $C_1 = 1/\lambda_L$ 则上式可写为:

$$\omega - \Omega C_1 > 0 \quad \text{安全} \quad (1a)$$

$$\omega - \Omega C_1 \leq 0 \quad \text{不安全} \quad (1b)$$

$$\omega - \Omega C_1 = 0 \quad \text{边界} \quad (1c)$$

2.2.2 柔性转子

由于人们认识水平的提高和工业发展的需求,有些转子的工作转速高于其一阶临界转速,这类转子称之为柔性转子。即满足下列条件

$$U_\omega > U_\omega \text{ 或 } U_\lambda > 1$$

此时需分稳态响应和加速过程两种情况讨论:

(a) 稳态响应情况

此时可靠性安全裕量方程和安全边界方程为:

$$\omega - \Omega/\lambda_u < 0 \quad \text{安全} \quad (2a)$$

$$\omega - \Omega/\lambda_u \geq 0 \quad \text{不安全} \quad (2b)$$

$$\omega - \Omega/\lambda_u = 0 \quad \text{边界} \quad (2c)$$

(b) 升速过程情况

在转子从圆频率为零,增至圆频率为 Ω 过程中,其轴心运动轨迹 Z 不仅和时间有关而且和其加速性有关,即

$$Z(t) = f[t, a(t)]$$

式中 $a(t)$ 为角加速度,用符号 $|Z|_{\max}$ 代表加速过程中最大振幅值,通常以较大加速度冲过临界转速区即 $\lambda \approx 1$ 以减小最大的振幅值(在此作者指出冲过临界转速可减小最大振幅值但对转子的寿命仍会有影响)。再令

$$\beta_{\max} = |Z|_{\max}/e$$

则此时对应的设计准则为

$$\beta_{\max} < \beta^*$$

式中 $|Z|_{\max}$, e , β_{\max} 都为随机变量, β^* 可视为

规定值。

3 单圆盘转子振动可靠性计算数学模型

在一般情况下,转子固有频率 ω 及工作转速 Ω 均可视为具有正态分布的随机变量, ω 和 Ω 之间是相互独立的。因此我们可从线性安全裕量方程(1a)(2a),很容易写出对应可靠性系数 β_r 的方程,再根据 β_r 值查正态积分表即可求出单盘转子的振动破坏概率 P_r 或可靠度 R 。

现以公式(1a)为例,写出如下:

$$\beta_r = \frac{U_\omega - C_1 U_\Omega}{\sqrt{\sigma_\omega^2 + C_1^2 \sigma_\Omega^2}} \quad (3)$$

$$P_r = \Psi(\beta_r) \quad (4)$$

$$R = \Phi(\beta_r) \quad (5)$$

工程上经常难以准确知道标准差的数值,因此常以同类情况下的变差系数 V (标准差除以均值)来描述标准差,因此式(3)又可写成如下形式。

$$\beta_r = \frac{U_\omega - C_1 U_\Omega}{\sqrt{V_\omega^2 U_\omega^2 + C_1^2 V_\Omega^2 U_\Omega^2}} \quad (6)$$

用符号 U_λ 表示 U_ω, U_Ω 比值,可称 U_λ 计算安全系数,则上式可改写如下

$$\beta_r = \frac{1/U_\lambda - C_1}{\sqrt{V_\omega^2/U_\lambda^2 + C_1^2 V_\Omega^2}} \quad (7)$$

对不同 $U_\lambda, V_\omega, V_\Omega$ 和 C_1 可用式(7)求得可靠性系数 β_r 的值,再根据 β_r 值查正态积分表即可求出单盘转子的振动破坏概率 P_r 或可靠度 R 。

分析式(7)可以得到以下几点结论:

随阻尼增大,单圆盘刚性转子振动可靠性增大;随许可振幅放大系数增大,单圆盘刚性转子振动可靠性增大;随频率比减小,单圆盘刚性转子振动可靠性增大;随固有频率和工作频率分散度增加即有较大的变差系数,单圆盘刚性转子振动可靠性降低。因此提高

转子设计、加工精度以及减少工作频率的分散度将有利于提高转子的可靠度。

4 算例

有一转子试验台,叶轮质量为 398.6 kg,转轴的跨度为 800 mm,直径为 120 mm,材料弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$,阻尼系数为 0.05,计算出临界转速为 7500 r/min,由于加工、材料性能等方面的偏差估计临界转速的变差系数为 0.1,转子的工作转速为 3000 r/min,其变差系数为 0.10,在许可振幅放大系数为 2.0 的情况下用式(7)计算出可靠性系数为 4.610,查正态积分表得可靠度为 0.999998。

5 结论

从分析可以看出考虑转子的振动可靠性有别于一般的振动的考虑,它考虑到了工作转速的分散性和临界转速的分散性。对单盘转子,增加阻尼,减小频率比,减小固有频率和工作频率的分散性,增大许可振幅放大系数都有助于转子振动可靠性的提高。本文的方法可作为单盘转子振动设计的依据,也可作为研究多盘转子振动可靠性的理论基础。

参 考 文 献

- 1 Shinozuka M and Astill C J. Random eigenvalue problems in structural Analysis. AIAA J. 16,1972
- 2 Lin Y K. Probabilistic theory of structural dynamics. McGraw-Hill, NEW YORK, 1967
- 3 冯元生等. 结构振动可靠性. 西北工业大学资料, 1991
- 4 倪振华. 振动力学. 西安交通大学出版社, 1989
- 5 钟一鄂等. 转子动力学. 清华大学出版社, 1987

(梁源历 编辑)

ГТД1500 燃气轮机

据《Gas Turbine World》1994年5—6月号报道,以其驱动米格29型歼击机的PД—33型涡扇发动机著称,位于俄罗斯圣彼得堡的克里莫夫航空发动机设计局是当今俄罗斯中小功率涡轴和涡桨发动机的主要设计者。与韩国哈拉工程公司合作,该设计局最近推出了由1838 kW的TB7—117涡桨发动机改型得到的1.45 MW的ГТД1500型燃气轮机。

TB7—117主要装备于双发动机的伊留辛Ил—114支线民航机。该型第一架飞机于1990年3月投入飞行。其工业型目前正在克里莫夫试验,一旦研制取得较大进展,它将被运到韩国作为ГТД1500示范机。

ГТД1500燃机为双轴布置。6级轴流式压气机的前面部分是5个轴流式级,末级是离心式级,总压比为14:1。环形燃烧室;二级轴流式涡轮,涡轮进口温度为1177℃;二级轴流式自由动力涡轮,排气温度为497℃,使该燃机十分适合用于余热回收和热电联产。该燃机计算机化的控制系统使其能进行远距离无人操作。它可燃用柴油、煤油或天然气。

作为箱式发电机组,在ISO条件下燃用气体燃料,ГТД1500燃机的基本额定功率为1200 kW,尖峰额定功率为1450 kW,燃耗率为0.32 kg/(kW·h)。可用作50或60Hz备用和基本负荷发电机组。箱装体长12 m,宽3 m,高3.4 m,总重为30 t。它也可以模块的形式空运到现场进行装配和试运转。该箱装体设计成能经受里氏9级地震的冲击。

给ГТД1500燃机加装余热锅炉,组成热电联产装置,其热效率高达75%。

ГТД1500最初保证的大修寿命为7200 h,将逐步增加到30 000 h。

(学牛 供稿)

Based on the calculation method given in Reference [1] for hydrocarbon gas thermodynamic properties the author has calculated the thermodynamic state parameters. An irreversibility conception is introduced during the calculation of such parameters. A general program for solving gas thermodynamic parameters has been drawn up, which is suitable for gases generated as a result of the combustion of hydrocarbon fuels of arbitrary hydrocarbon ratio with fuel factor β ranging from 0-1 and temperature ranging from 200 K to 1800 K. The aerodynamic parameters obtained have been compared with the multiple specific heat results given in Reference [2] and the difference is found to be within 0.1%. The calculation program features a rational solution and ease of application, making it suitable for use in various engineering designs. **Key words:** variable specific heat, irreversible thermophysical properties, analytical solution

△ **The reliability Analysis of Single Disk Rotor Vibrations**.....Xu Zili (*Harbin Institute of Technology*) **Journal of Engineering for Thermal Energy & Power**, 1995, 10(1): 49~52

Described in this paper is a calculation formula for a single disk rotor system vibration response. A reliability safe margin equation of the rotor corresponding to a vibration failure mode has been deduced and the vibration reliability calculation mathematical model for the single disk rotor system established. This paper also discusses the effect of the variation of various parameters on the rotor vibration reliability and gives a calculation example to illustrate the applicability of the above-cited method. **Key words:** single disk rotor, reliability

△ **A New Type of Thermal Insulation Material with a Reflective Multi-layer Thermal Insulation Structure**.....Xiong Yangheng (*Wuhan University of Electric Power Engineering & Water Resources*) **Journal of Engineering for Thermal Energy & Power**, 1995, 10(1): 53~56

On the basis of the author's earlier work the thermal insulation performance of a reflective multi-layer insulation structure was analysed and calculated during its use in a variety of conditions. The technico-economic performance of the new structure is compared to that of other conventional thermal insulation materials. The results of comparison show that the new thermal insulation structure features a better comprehensive technico-economic performance **Key words:** thermal insulation, reflective multi-layer structure of thermal insulation, technico-economic performance, critical heat insulation layer number

△ **The Failure Analysis of a Boiler Lower Header**.....Wu Qingyu, et al. (*Boiler & Pressure Vessel Inspection Institution under the Harbin Labor Bureau*) **Journal of Engineering for Thermal Energy & Power**, 1995, 10(1): 57~60

A multitude of ring-shaped cracks and three water leakage points were discovered in the right side lower header of a boiler together with a cave-in of the boiler roof water-cooled wall. Through the metallographic analysis of the materials used for the left and right side lower header and the said water-cooled wall as well as an analysis of the boiler construction and water circulation circuits the cause of the boiler lower header failure was finally identified. **Key words:** boiler, lower header, metallographic structure, failure analysis