

航空齿轮弯曲疲劳寿命预测方法的探讨*

西北工业大学 徐颖强** 何大为 钱管良

【摘要】 综合分析了齿轮的常规弯曲疲劳寿命预测方法在航空齿轮设计中的局限性,同时探讨了利用局部应力—应变法研究齿轮弯曲疲劳寿命的可能性,文中根据有关实验结果,进行算例分析,并获得了一些重要结论。

主题词: 齿轮 寿命 预测 应力—应变关系

分类号: O 346. 2

1 引言

局部应力—应变法能抓住疲劳破坏的局部性这一关键环节,并且通过雨流计数法把复杂载荷历程分解为一系列的与封闭的迟滞回线相对应的载荷循环,但是,该法对于高循环疲劳的计算精度较低,而齿轮的传动形式主要是中高循环传动^[1]。为此,本文旨在将局部应力—应变法在高循环疲劳中的近期研究成果,应用到齿轮弯曲疲劳寿命预测中,并且结合一些实验结果进行算例分析。局部应力—应变法在估算疲劳危险区小块材料的疲劳寿命,是将该试样的 $\epsilon-N$ 特性等同于标准光滑小试样的应变—应力特性,即采用了等应变等损伤的假设,而没有考虑实际零件与标准光滑小试样的差异,这对于以塑性应变为主的低循环疲劳来说是没有太大的影响,而对于象齿轮等长寿命的零构件,在工作中以弹性应变为主,这种差异所造成的寿命估算是非常大的。因此,对于局部应力—应变法,在应用于齿轮的定寿中,必须进行必要修正。

疲劳研究,目前主要有实验拟合法和 b 值修正法两种^[2,3]。而相比之下, b 值修正法的预测精度较高。所以,本文探讨用此法对一具体的齿轮材料的 b 值进行修正,寻得合适的修正值。

2 b 值修正法

局部应力—应变法分析的数学模型为:

$$\begin{aligned}\Delta\epsilon/2 &= \sigma'_f (2N_f)^b/E + \epsilon'_f (2N_f)^c \\ \Delta\sigma \cdot \Delta\epsilon &= K_\sigma^2 (\Delta S)_2/E\end{aligned}\quad (1)$$

式中: σ'_f 为疲劳强度系数; b 为疲劳强度指数; E 为材料弹性模量; ϵ'_f 为疲劳塑性系数; c 为疲劳塑性指数; K_σ 为有效应力集中系数; ΔS 为名义应力; $\Delta\sigma$ 和 $\Delta\epsilon$ 分别为局部应力和局部应变。此关系式是通过几十种金属材料的大量实验获得的。对于低循环疲劳寿命的预测结果,与实验结果比较接近。而对于机械构件高周疲劳寿命的预测,其结果与实际相差较大。究其原因,中、高周疲劳机械构件的工作应力不高、工作时间较长,其裂纹萌生寿命大于转变寿命 N_T ,即在构

件危险部位的局部应变中,弹性应变占主导作用,其疲劳破坏的性质属于应力疲劳,而弹性应变疲劳的影响因素是很多的。一般较大的影响因素有应力集中系数、平均应力、表面加工情况、尺寸因素等。从关系式(1)可以看出前两影响因素已在第二个关系式中考虑,本文主要考虑表面加工系数和尺寸因素对应变—寿命曲线进行修正。又根据文献[4],表面加工情况只对 $\epsilon_a \sim 2N_f$ 曲线的弹性线部分产生较大的影响,而对塑性线部分无明显的影响。尺寸因素对 $\epsilon_a \sim 2N_f$ 曲线的影响也有类似的性质。因此可见,在对 $\epsilon_a \sim 2N_f$ 曲线进行修正时,只对其弹性线部分加以修正,而对塑性线部分不加修正。

由(1)式可知,影响弹性部分应变主要有 E 、 σ_f' 和 b 。材料一定, E 为常数。 σ_f' 和 b 反映材料受载后的疲劳性能,对于不同的受载状况(指低周或高周疲劳),不同的机械构件以及不同的加工状态,其值有所不同。另外,根据最近的研究报导,赵少汴等人假设 σ_f' 不变,对 b 值进行修正,来估计汽车车架和后桥壳体的中高疲劳寿命,其结果与实验非常接近。

b 值修正的具体步骤如下(见图1):首先,以 $2N_f = 1$ 为一点,求弹性应变,即: $\epsilon_{ca1} = \sigma_f' (2N_f)^b / E$ 。其次,以 $2N_f = 2 \times 10^7$ 为另一点,其不加修正时的弹性应变为 $\epsilon_{ca2} = \sigma_f' (2 \times 10^7)^b / E$ 。再次,根据下一节所介绍确定齿轮加工因素 K_B 和尺寸因素 K_ϵ 的方法,对上面的第二点应变值修正,有: $\epsilon_{ca2} = K_B \cdot K_\epsilon \cdot \epsilon_{ca20}$ 。最后,以 $(1, \epsilon_{ca1})$, $(2 \times 10^7, \epsilon_{ca2})$ 两点,在对数坐标系上作一等值线,其斜率就是 b 值的修正值。

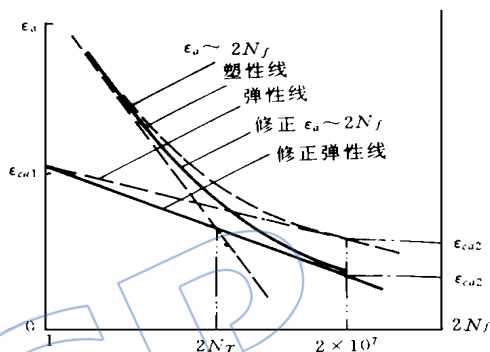


图1 应变—寿命曲线修正示意

下面主要介绍利用局部应力—应变法预测齿轮弯曲疲劳寿命时,应如何考虑几个关键因素的影响。

(1) 应力集中系数。常规的齿轮设计,主要考虑有效应力集中和载荷作用的位置,如图2所示。一般可以通过下式计算或有关设计手册获得应力集中系数。

$$K_t = 0.18 + 1/(\rho/2b)^{0.15} \cdot (h/2b)^{0.45} \quad (2)$$

式中: h 是加载中心到齿根连线距离,该式仅适应于压力角为20的齿轮。

由于磨削,原来渗碳淬火产生的残余压缩应力减少,有时甚至出现拉伸应力;剃齿时的剃齿台阶也对齿根强度有影响。有关这些因素的影响,目前齿根应力集中系数还无法定量估计,对特殊应用齿轮,如航空齿轮,则必须就具体情况进行深入研究。要说明的一点是以上所确定的应力集中系数偏安全。

(2) 尺寸系数。由于轮齿的尺寸变化而引起的疲劳强度改变的现象,是材料不均匀性的系数,主要受以下几个因素影响:轮齿的尺寸、齿轮的直径、轮齿尺寸和齿轮直径之比、齿宽、渗碳深度和轮齿尺寸之比、材料的淬透性和热处理及力学性能、残余应力的大小及其梯度方向等。其值一般取为1,也可由模数从齿轮设计手册中查得。

(3) 表面加工系数。主要反映齿根表面加工状况对其弯曲疲劳强度的影响情况。对于不同

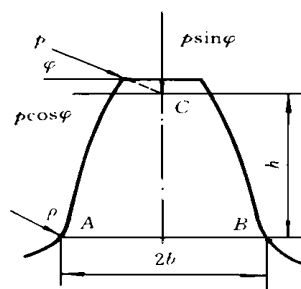


图2 受载齿轮及其几何参数

的加工方式,如切齿、剃齿、研磨、磨齿、喷丸等工艺所影响的齿根状况不同,反映到齿根弯曲疲劳性能也不相同,齿根残余应力和加工硬化也有一定的影响,一般取为 1。

3 齿轮寿命估算

用文献[5]中的有关实验数据,进行齿轮弯曲疲劳寿命的局部应力—应变法计算分析。齿轮材料为 45# 钢正火处理。热处理 850°C1 小时空冷;最大屈服强度 44.0 kgf/mm²;最低屈服强度 41.0 kgf/mm²;拉伸强度 69.5 kgf/mm²;断裂强度 120.0 kgf/mm²; $\delta=30.8\%$; $\varphi=53.0\%$; 维氏硬度 189 HV。齿轮的几何参数和测试条件为:压力角 20°,倒角半径 0.375 m;齿顶间隙 0.25 m;模数 $m=4$;齿数 $z=18$;变位系数 $x=0$;加载位置 40.0 mm。通过前面所介绍的修正方法及由文献[4]查得齿轮材料的疲劳性能参数为: $K'=1153$ MPa; $n'=0.179$; $b=-0.123$; $b'=-0.154$; $c=-0.526$; $\epsilon'=0.465$; $\sigma'_f=115$ MPa。在计算中所用的载荷谱按该文献中的实验程序载荷进行分析。利用(3)、(4)式,计算齿轮弯曲疲劳寿命的结果为: b 未修正和修正后计算寿命分别为 1.88982×10^7 和 8.813485×10^5 。利用 MNER 等损伤理论估算寿命。

$$\Delta\epsilon \cdot \Delta\sigma = K'(\Delta S)^2/E, \quad \Delta\epsilon = \Delta\sigma/E + (\Delta\sigma/K')^{1/n'} \quad (3)$$

$$D_1 = 2(\epsilon'/\epsilon_p)^{1/c}, \quad D_2 = 2[\sigma'_f - \sigma_m]/\sigma_a^{1/b} \quad (4)$$

式中: K' 为循环强度系数; n' 为循环应变硬化指数; ϵ_p 为应变幅的塑性分量; σ_a 为应力幅; ϵ 为应变幅的弹性分量; σ_m 为平均应力; D_1 和 D_2 分别为两种情况的损伤量。

对比计算和实验的结果,在最大峰应力都发生屈服,而试验寿命取为 1×10^6 循环的条件下, b 未修正和 b 修正后的精度系数 N_t/N_{test} 分别为 18.897 和 0.88134。通过对 b 值的修正计算,所预计的寿命比实验结果稍小一点。但是,利用局部应力—应变法所估算的寿命是裂纹形成寿命,而实验的结果包括裂纹形成和扩展总寿命,由此可见计算结果与实验基本吻合。

4 分析讨论

(1) 通过上面的实验分析计算,对于局部应力—应变法进行一定的改进(b 值修正),该法可以用于齿轮的弯曲疲劳定寿中。(2) 对于齿轮弯曲寿命的局部应力—应变分析,修正 b 值时,是否还应该考虑强化因素,此问题有待进一步研究。(3) 本文计算用实验室的程序载荷谱,其特点是加载位置不变,如果应用于工程实际,如航空齿轮传动,其齿轮齿根的应力状态比较复杂,如弯曲应力、接触应力的影响、摩擦应力、动应力等综合产生的应力谱有待进一步研究。

参 考 文 献

- 1 高镇同等. 疲劳/断裂可靠性研究现状与展望. 机械强度, 1995, (3)
- 2 Rice Richard C, Editor, etc. Fatigue Design Handbook. Second Edition, Published by: SAE, Inc. 1988
- 3 赵少沭等编著. 抗疲劳设计. 北京: 机械工业出版社, 1994
- 4 徐灏. 疲劳强度. 高等教育出版社, 1988
- 5 TOBE TOSHIMI et al. Bending Strength of Spur Gear Teeth (1st Report, 2nd Report, 3rd Report). Bulletin of the JSM E, 1982, 25: 209

(责任编辑 王震华)

CALCULATION OF THERMAL RATE IN ANALYZING THERMAL STRESSES

Zhang Jiazhong, Xia Songbo, Zhang Ying

(Power Engineering Dept Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

ABSTRACT The real- time monitoring of rotor life consumption makes urgent demands on exact real- time calculation of the thermal rate in analyzing thermal stresses. In order to eliminate the data fluctuation in temperature sampling and meet the demands of real- time calculation, the zone linear regression is adapted to accomplish the data filtering of thermal rate curves instead nonlinear regression, and the time subdomains are so divided, that the later one covers as much as possible the data of former one except first sampling data. As a result, a recurrence formula of the regression has been worked out. The exactness of the formula has been verified by numerical simulation. The convergence and filtering efficiency of the method are very well.

Key Words Thermal rate Thermal stress Regression analysis

RESEARCH ON BENDING FATIGUE LIFE PREDICTION METHOD OF AIRCRAFT GEARS

Xu Yingqiang, He Dawei, Qian Guanliang

(7th Dept Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

ABSTRACT The limitations of the conventional bending fatigue life prediction method for aircraft gears are investigated and the applicability of local stress- strain approach to the gear bending fatigue life analysis is researched. Some valuable conclusions have been drawn from comparison between the computational results and experimental data.

Key Words Gears Lifetimes Prediction technique

EFFECTIVENESS OF AN ADVANCED HYBRID SQUEEZE FILM DAMPER ON NONSYNCHRONOUS RESPONSE SUPPRESSION

Zhu Changsheng

(Dept of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

ABSTRACT The effectiveness of an advanced Hybrid Squeeze Film Damper (HSFD) without the retainer springs on suppressing the nonsynchronous response of the rotor system was studied theoretically. A flexible rotor supported on the orifice- compensated HSFD is taken as an example. It is shown that the HSFD is able not only to improve obviously the highly nonlinear behaviours of the conventional squeeze film dampers, but also to enhance its capability of nonsynchronous response suppression greatly.

Key Words Rotors Dampers Non- linear Dynamic properties

A RING- LIKE METAL RUBBER DAMPER

Wang Xin and Zhu Zigen

(4th Dept Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT A new kind of rotor damper, Ring- like Metal Rubber Damper (RMRD), has been invented. Its application to a rotor rig shows that RMRD has excellent damping property and linear characteristics. RMRD has better damping effects and can with-