

南京航空航天大学 论文集

(二〇〇〇年)

第15册

五院

南京航空航天大学科技部编

二〇〇一年六月

书 481

五 院

○五一系～○五二系



目 录

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
418	鲁文龙 朱如鹏 曾 英	硕士	051	正交面齿轮传动中齿面曲率研究	南京航空航天大学学报	003204	J
419	陶 峰 张 雨 刘正坝 戴振东	讲师	051	螺栓联接件的微动损伤及其涂胶防护试验研究	机械科学与技术	001906	H
420	陶 峰 欧阳行 刘正坝	讲师	051	用模糊综合评判法评估薄壁容器的寿命	南京航空航天大学学报	003203	J
421	陶 峰 张险峰 欧阳行	讲师	051	螺纹联接件的微动损伤研究	机械强度	002202	J
422	张中元	教授	051	薄板冲压成形过程仿真	2000 年 ANSYS 中国用户年会	2000	
423	李 凡 李靖谊	硕士	051	异向弯边零件橡皮成形过程数值模拟	2000 年 ANSYS 中国用户年会	2000	
424	金卫红 李靖谊 张中元	硕士	051	DYNASD 在高压橡皮成形压延零件的有限元仿真中的应用	2000 年 ANSYS 中国用户年会	2000	
425	左敦稳 薛善良 王 珉	教授	052	用于电沉积工具的镍铁合金结合剂工艺研究	工具技术	003402	J
426	左敦稳 朱纪军 王 珉	教授	052	基于 LM 算法的无氢类金刚石薄膜喇曼高斯分解	中国机械工程	001111	H
427	左敦稳 薛善良 王 珉	教授	052	镍铁合金电沉积金刚石工具的研制	机械科学与技术	001906	H
428	左敦稳 张春明 王 珉	教授	052	等离子喷涂 PZT 涂层压电性能的实验研究	中国机械工程	001104	H
429	左敦稳 薛善良 王 珉	教授	052	镍铁结合剂电沉积金刚石套料钻的性能研究	南京理工大学学报	002404	J
430	左敦稳 黎向峰 王 珉	教授	052	Adhesion improvement of CVD diamond film by introducing electro-deposited interlayer	Proceedings of IMCC'2000	2000	
431	苏 兵 左敦稳 徐松源	博士	052	存储器 IC 卡数据传输的加密研究	哈尔滨理工大学学报	000504	J
432	苏 兵 李 亮 左敦稳 王 珉	博士	052	Security technology of smart card applied in information system	Proceedings of IMCC'2000	2000	
433	汪 炜 胡建华 高长水 刘正坝	讲师	052	Windows 95 数控软件实时控制的实现	电加工与模具	000002	

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
434	曾 励 汪通悦 徐龙祥 刘正坝	博士后	052	永磁电磁轴承产生悬浮力的机理研究	航空学报	002103	H
435	谢国治 左敦稳 王 珉	博士	052	钎料对单层钎焊砂盘磨粒结合性能的影响	金刚石与磨料磨具工程	0000115	J
436	谢国治 左敦稳 王 珉	博士	052	单层钎焊砂盘磨粒分布有序性研究	南京航空航天大学学报	003203	J
437	黎向锋 左敦稳 王 珉	博士	052	通过过渡层改善金刚石膜和基底间的结合性能	材料开发与应用	001501	J
438	杨勇生 左敦稳 王 珉	博士	052	一种新的隐藏曲线消除算法及其应用	工程图学学报	000001	J*
439	胡建华 汪 炜 高长水 刘正坝	博士	052	模糊控制技术在电火花成形加工过程中的应用	电加工与模具	000001	
440	屠立忠 季 平 左敦稳 王 珉	博士	052	分布式参数化路径计划技术初探	系统仿真学报	001201	J
441	刘 苏	副教授	052	风洞应变天平 CAD 系统的研制	机械设计与制造工程	002906	J
442	裴景玉 高长水 刘正坝	博士	052	在微细电火花加工极间放电状态高速采集系统中的 DMA 技术	数据采集与处理	001502	H
443	裴景玉 韩 静 高长水 刘正坝	博士	052	用于 Micro-EDM 放电状态分类的多传感器集成与信息融合系统	数据采集与处理	001503	H
444	裴景玉 高长水 刘正坝	博士	052	多传感数据融合技术在微细电火花加工放电状态检测中的应用	电加工与模具	000003	
445	严荣国 薛重德 赵国光	硕士	052	椭圆微驱动电火花加工装置中电极的驱动与控制	电加工与模具	000006	
446	吴安德 王帮峰 吕益艳 云乃彰	博士	052	一种新的快速成型技术-选择性电铸	中国机械工程	0011 增	H
447	肖 冰 武志斌 徐鸿钧	博士	052	金刚石与金属基体钎焊机理的研究	航空精密制造技术	003606	J
448	赵剑峰 李 悦 张剑华 黄因慧	讲师	052	基于 SLS 技术的金属零件快速制造研究	特种铸造及有色合金	000005	H
449	赵剑峰 李 悦 张剑华	讲师	052	Analysis on Wear Characteristic of EDM Electrode Made by Selective Laser	Proceedings of the Ninth International Manufacturing Conference in China	2000	
450	赵剑峰 李 悦 张建华	讲师	052	激光烧结 EDM 电极损耗特性试验研究	2000 年全国博士后大会学术会议	2000	

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
451	张建华 赵剑峰 李小林	博士	052	铸造型壳快速制造技术中的数据处理	21 世纪新产品快速开发 技术会议	2000	
452	张建华 赵剑峰 余承业	博士	052	基于选择性激光烧结的铸造熔模快速 制造技术	铸造	004912	H
453	何 宁 曹先红 王志刚 杨利利 姜澄宇 徐九华	教授	052	大型钢锭切割加工工艺技术	机械设计与制造式程	002904	J
454	王志刚 何 宁 张 兵 姜澄宇	硕士	052	航空薄壁零件加工变形的有限元分析	航空精密制造技术	003606	J
455	梅胜敏 余大民	副教授	052	提高 Al/SiC 复合材料抗蚀性的准分子 激光气体合金化研究	中国激光	002704	H
456	郭海生 金孝红 云乃彰	硕士	052	选择性电沉积快速成形法	电加工与模具	000005	
457	庄 磊 王 珉 左敦稳	博士	052	齿轮加工机床的发展特点及相关技术	江苏机械制造与自动化	000005	
458	徐 峰 方 捷 左敦稳 陈建满 张 静	硕士	052	高校管理信息系统若干问题的探讨	南京航空航天大学学报 (社会科学版)	000202	
459	王亦红 云乃彰 徐家文	博士	052	水平井生产管电化学射孔器的设计及 试验	石油机械	002808	J
460	王亦红 徐家文 云乃彰	博士	052	固定阴极电化学射孔的成影规律研究	电加工与模具	000002	
461	王亦红 徐家文 云乃彰	博士	052	Research on Shaping Law of Electrochemical Reforformation with Fixed Cathode	东南大学学报(英文版)	001601	H
462	王亦红 云乃彰 徐家文	博士	052	水平井生产管电化学切割动态分析及 参数选择	石油机械	002805	J
463	魏守水 徐家文 赵淳生	博士	052	四轴数控电解加工整体叶轮阴极轨迹 计算及速度处理	中国机械工程	001107	H
464	胡平旺 钱 密 徐家文	博士	052	基于 MFC DAO 的叶轮加工数据库程 序设计	航空精密制造技术	003605	J
465	胡平旺 钱 密 徐家文	博士	052	利用 OpenGL 显示叶轮造型及模拟加 工	航空精密制造技术	003603	J
466	朱永伟 胡平旺 徐家文	博士	052	整体叶轮的数控展成电解加工方法及 试验	电加工与模具	000003	

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
467	朱永伟 胡平旺 徐家文	博士	052	整体叶轮数控展成电解加工阴极的设计	航空精密制造技术	003603	J
468	苑寅秋 王 珉 左敦稳	博士	052	磨合匹配表面形貌的分形特性研究	机械工程学报	003612	H
469	肖 冰 武志斌 徐鸿钧	博士	052	Ni-Cr 合金真空感应钎焊单层金刚石砂轮的实验研究	工具技术	003410	J

正交面齿轮传动中齿面曲率研究

鲁文龙 朱如鹏 曾 英

(南京航空航天大学机电工程学院 南京, 210016)

摘要 齿面曲率对齿轮传动的性能有重要影响, 而有关面齿轮传动的曲率还没有得到充分的研究。文中利用微分几何原理推导了面齿轮传动的齿面主曲率与主方向, 由此得出面齿轮传动中诱导法曲率的两个主值; 开发了相应的程序; 进行了实例计算; 分析了传动中的主要参数对曲率的影响, 所获得的结论对面齿轮传动的强度计算与分析具有参考价值。

关键词: 机械传动; 平面齿轮; 曲率; 强度

中图分类号: TH132.421; TH132.41

引 言

面齿轮传动是一种圆柱齿轮与圆锥齿轮相啮合的齿轮传动, 面齿轮由尺寸与啮合中的渐开线圆柱齿轮相同或者相近的刀具经范成加工而成, 有许多独特的优点和几何现象^[1,2]。轮齿的齿面曲率是衡量齿轮传动质量的重要参数, 对齿面的磨损与润滑条件、齿面压应力的影响、接触区的形状等都有直接影响。因此, 对面齿轮传动中的齿面曲率作出研究具有重要意义。由于对面齿轮传动的研究还不充分, 且其齿形较为复杂, 有关齿面曲率的研究还没有进行。本文利用微分几何原理对面齿轮传动的齿面曲率作了研究, 揭示了传动参数对曲率的影响规律。

1 面齿轮传动齿面的基本方程

面齿轮是用直齿渐开线齿轮刀具经范成加工而成。现采用 4 个坐标系(见图 1): 与刀具 s 和齿轮 2 一同转动的两个动坐标系 S_s 和 S_2 ; 刀具 s 和齿轮 2 初始位置的两个固定坐标系 S_{s0} 和 S_{20} 。其中, 坐标原点 O_s 和 O_2 都在 O 点; Z_{s0} 和 Z_s 同轴, 为刀具的转动轴线; Z_{20} 和 Z_2 同轴, 为被加

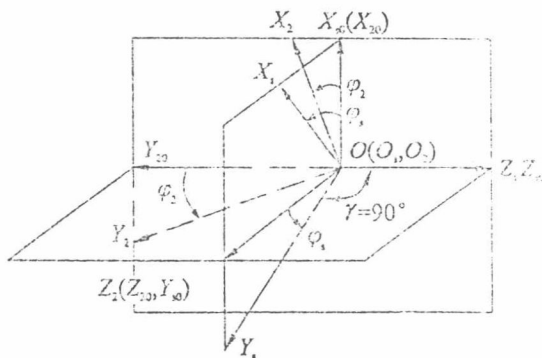


图 1 正交面齿轮加工时的坐标系

* 国家自然科学基金(编号:19675005)和航空科学基金(编号:97C52023)资助项目。

收稿日期:1999-07-12; 修改稿收到日期:1999-12-13

第一作者:鲁文龙,男,博士生,1974 年 10 月生。

工面齿轮的转动轴线。用 φ_s 和 φ_2 分别表示刀具的转角和齿轮 2 的转角,在以下的讨论中设 Z_s 和 Z_2 轴间的夹角为 90° 。刀具渐开线齿面方程为^[4]

$$r_s(u_s, \theta_s) = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pm r_{bs}[\sin(\theta_{0s} + \theta_s) - \theta_s \cos(\theta_{0s} + \theta_s)] \\ -r_{bs}[\cos(\theta_{0s} + \theta_s) + \theta_s \sin(\theta_{0s} + \theta_s)] \\ u_s \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, r_{bs} 为刀具渐开线的基圆半径; u_s 为刀具齿面上一点的轴向参数; θ_s 为刀具渐开线上一点的角度参数。 u_s 和 θ_s 为渐开线齿面的参数,式(1)中的上下符号分别对应于刀具齿槽两侧渐开线 γ - γ 和 β - β , θ_{0s} 由下式确定

$$\theta_{0s} = \pi/2N_s - \text{inv}\alpha \quad (2)$$

式中, N_s 为刀具的齿数; α 为刀具压力角。刀具上的点随同 S_s 运动与随同 S_2 运动间的相对速度 $\vec{v}^{(s2)}$ 为

$$\vec{v}^{(s2)} = \begin{bmatrix} v_x^{(s2)} \\ v_y^{(s2)} \\ v_z^{(s2)} \end{bmatrix} = \omega_s \begin{bmatrix} -y_s - z_s q_{2s} \cos \varphi_s \\ x_s + z_s q_{2s} \sin \varphi_s \\ q_{2s}(x_s \cos \varphi_s - y_s \sin \varphi_s) \end{bmatrix}$$

式中, ω_s 为刀具的角速度; $q_{2s} = N_2/N_s$ 为面齿轮齿数与刀具齿数的比,称为齿数比;并且有 $q_{2s} = N_s/N_2 = \omega_2/\omega_s = \varphi_2/\varphi_s$ (ω_2 为面齿轮的角速度)。刀具与被加工齿轮的啮合方程

$$f(u_s, \theta_s, \varphi_s) = r_{bs} - u_s q_{2s} \cos \varphi_s \quad (3)$$

式中, $\varphi_s = \varphi_s \pm (\theta_{0s} + \theta_s)$ 。由坐标系 S_s 到坐标系 S_2 间的转换关系,可得面齿轮的齿面方程为

$$\begin{cases} x_2 = r_{bs} [\cos \varphi_2 (\sin \varphi_s \mp \theta_s \cos \varphi_s) - \sin \varphi_2 / (q_{2s} \cos \varphi_s)] \\ y_2 = -r_{bs} [\sin \varphi_2 (\sin \varphi_s \mp \theta_s \cos \varphi_s) + \cos \varphi_2 / (q_{2s} \cos \varphi_s)] \\ z_2 = -r_{bs} (\cos \varphi_s \pm \theta_s \sin \varphi_s) \end{cases} \quad (4)$$

如果在啮合传动中所用的小齿轮与加工面齿轮时的刀具相同,则啮合为线接触。但是,由于各种误差的作用,线接触情况在实际中是不能实现的,其结果是出现偏载。因此,要将面齿轮传动设计成局部接触,啮合传动中可采用比刀具少 1~3 个齿的圆柱齿轮。圆柱齿轮的齿面方程同式(1),只要将其中的下标“s”换为“1”即可。

2 面齿轮传动的曲率

2.1 各齿轮的主曲率及主方向

由微分几何可知,式(4)可用矢量式表示为

$$\vec{r} = x_2 \vec{i} + y_2 \vec{j} + z_2 \vec{k}$$

则可求出 $\vec{r}_{\theta_s}, \vec{r}_{\varphi_s}, \vec{r}_{\theta_s \varphi_s}, \vec{r}_{\varphi_s \theta_s}, \vec{r}_{\theta_s \theta_s}$, 此处 $\vec{r}_{\theta_s}$ 表示 $\vec{r}$ 对参数 θ_s 求偏导数,其余类推。则齿面的单位法线矢量 $\vec{n}$ 为

$$\vec{n} = \vec{r}_{\theta_s} \times \vec{r}_{\varphi_s} / |\vec{r}_{\theta_s} \times \vec{r}_{\varphi_s}|$$

主曲率半径 R 应满足以下方程

$$(LN - M^2)R^2 + (2FM - EN - GL)R + (EG - F^2) = 0 \quad (5)$$

式中: $E = (\vec{r}_{\theta})^2$, $F = \vec{r}_{\theta} \cdot \vec{r}_{\varphi}$, $G = (\vec{r}_{\varphi})^2$, $L = -\vec{n}_{\theta} \cdot \vec{r}_{\theta} = \vec{n} \vec{r}_{\theta, \theta}$, $M = -\vec{n}_{\theta} \cdot \vec{r}_{\varphi} = \vec{n} \vec{r}_{\theta, \varphi}$, $N = -\vec{n}_{\varphi} \cdot \vec{r}_{\varphi} = \vec{n} \vec{r}_{\varphi, \varphi}$ 。

由式(5)可解出两根 R_1 和 R_2 , 则 $1/R_1$ 和 $1/R_2$ 即为两主曲率, 令 $K_1^{\text{II}} = 1/R_1$ 和 $K_2^{\text{II}} = 1/R_2$, 则由欧拉(Euler)公式可得任意方向的法曲率为

$$K^{\text{II}} = H^{\text{II}} + R^{\text{II}} \cos(2\varphi) \quad (6)$$

式中, $H^{\text{II}} = (K_1^{\text{II}} + K_2^{\text{II}})/2$, $R^{\text{II}} = (K_1^{\text{II}} - K_2^{\text{II}})/2$; φ 为任意方向的矢量与 $\vec{e}_1^{\text{II}}$ 的夹角。设主方向 $\lambda = d\theta_s/d\varphi$, 满足下列方程^[5,6]

$$(EM - FL)\lambda^2 + (EN - GL)\lambda + (EN - GM) = 0 \quad (7)$$

由式(7)可求出两主方向 λ_1^{II} 和 λ_2^{II} , 此两方向的单位矢量用 $\vec{e}_1^{\text{II}}$ 和 $\vec{e}_2^{\text{II}}$ 表示, 两矢量相互垂直。对于与面齿轮相啮合的圆柱齿轮可由方程 1 求出主曲率 K_1^{I} 和 K_2^{I} 及主方向 λ_1^{I} 和 λ_2^{I} 。

2.2 相互啮合齿轮齿面接触点处的诱导法曲率

有向角为 φ 的任意一个方向 $\vec{e}$ (见图 2), Σ_1 的法曲率为

$$K^{\text{I}} = H^{\text{I}} + R^{\text{I}} \cos 2\varphi$$

在同一个方向, Σ^{II} 的法曲率为

$$K^{\text{II}} = H^{\text{II}} + R^{\text{II}} \cos 2(\varphi - \varphi_1)$$

式中, φ_1 为面齿轮与圆柱齿轮主方向间的夹角(见图 2)。

图 2 相切曲面的曲率关系

两曲面在切点沿同一方向的法曲率之差为该方向的诱导法曲率, 用 K^{III} 表示, 即

$$K^{\text{III}} = K^{\text{I}} - K^{\text{II}} = K^{\text{III}} + (R^{\text{I}} - R^{\text{II}} \cos 2\varphi_1) \cos 2\varphi - R^{\text{II}} \sin 2\varphi_1 \sin 2\varphi$$

式中, $H^{\text{III}} = H^{\text{I}} - H^{\text{II}}$, 其主方向为

$$\tan 2\varphi = -R^{\text{II}} \sin 2\varphi_1 / (R^{\text{I}} - R^{\text{II}} \cos 2\varphi_1) \quad (8)$$

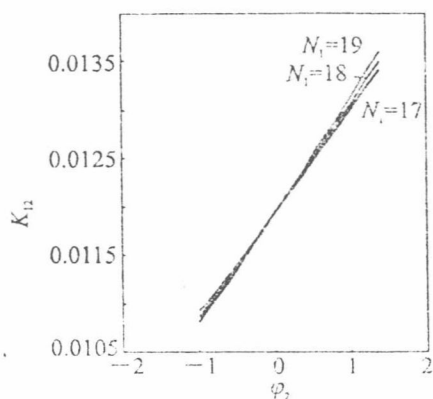
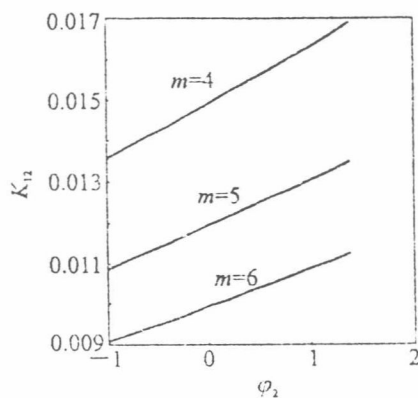
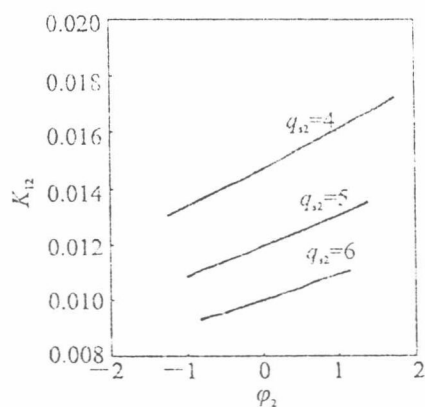
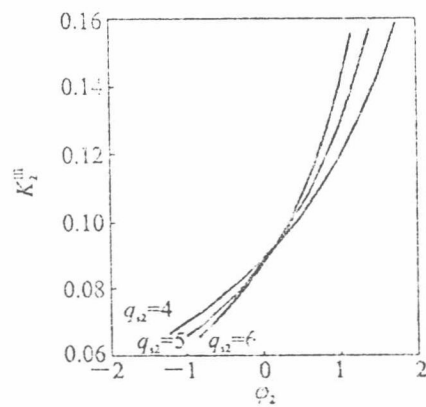
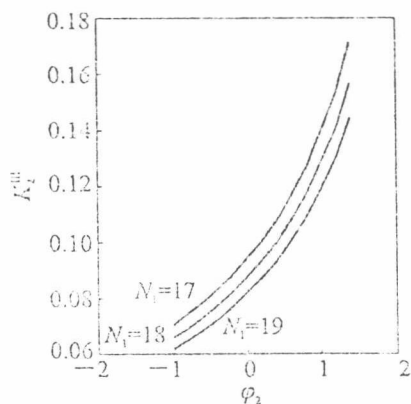
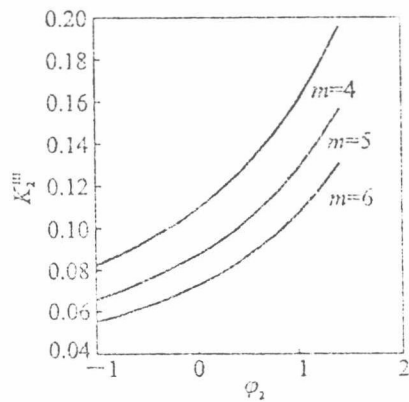
由此式可解出两个 φ 值, 一个是绝对值小于 $\pi/2$ 的角, 用 φ_s 表示, 并把它方向作为 K^{III} 的第一个主方向 $\vec{e}_1^{\text{III}}$, 相应的诱导法曲率的第一个主值用 K_1^{III} 表示。另一个 φ 角等于 $\pi/2 + \varphi_s$, 它相应于 K^{III} 的第二个主方向 $\vec{e}_2^{\text{III}}$ 及第二个主值。显然 $\vec{e}_1^{\text{III}}$ 与 $\vec{e}_2^{\text{III}}$ 是互相垂直的。把 φ_s 及 $\pi/2 + \varphi_s$ 的值代入式(8), 可得诱导法曲率的两个主值为

$$\begin{cases} K_1^{\text{III}} = H^{\text{III}} + R^{\text{III}} \\ K_2^{\text{III}} = H^{\text{III}} - R^{\text{III}} \end{cases} \quad (9)$$

3 计算结果及分析

根据上述理论, 本文分别从传动比的变化, 齿轮模数的变化及小齿轮与刀具齿数差的变化三个方面作了研究。为此, 作者已开发出相应的程序, 以下各图为相应的计算结果, 其计算参数为: 面齿轮齿数 $N_2 = 90$, 刀具齿数 $N_s = 20$, 压力角 $\alpha = 20^\circ$, 其余参数如图 2 所示。

经推导圆柱齿轮的两主曲率之一为 0, 另一为 $1/(r_{bs}\theta_s)$ 。面齿轮的主曲率之一 K_{12} 如图 3~5 所示, 另一主曲率 K_{22} 为负值, 但绝对值与 K_{12} 大小相近, 故文中未给出。面齿轮传动的主诱导法曲率之一 K_2^{III} 如图 6~8 所示, 另一主诱导法曲率 K_1^{III} 较小, 约为 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 之间, 限于篇幅也未给出。

图3 小齿轮齿数 N_1 变化对面齿轮曲率的影响图4 模数 m 变化对面齿轮曲率的影响图5 齿数比 q_{12} 变化对面齿轮曲率的影响图6 齿数比 q_{12} 变化对诱导法曲率的影响图7 小齿轮齿数 N_1 变化对诱导法曲率的影响图8 模数 m 变化对诱导法曲率的影响

进一步分析上述计算结果,可获得如下结论。

首先,对于齿面的曲率有:

(1) 面齿轮齿面曲率皆较小,数值在 0.02 以下,说明面齿轮齿面在某些近似计算中,有可能简化为一平面(见图 3~5);

(2) 模数、传动比增加会使齿面曲率减小,这是由于齿的几何尺寸变大的缘故;

(3) 刀具与小圆柱齿轮的齿数差略微变化(多 1~3 个齿),对曲率影响不十分明显,且在齿顶和齿根处曲率的增减变化相反(图 3)。

其次,对于主诱导法曲率有:

(1)诱导法曲率的较大主值比诱导法曲率的较小主值大得多,且数值主要由圆柱齿轮的主曲率确定。

(2)当传动比增加时,诱导法曲率的较小主值在开始啮合点附近几乎不变,而在其它位置减小;诱导法曲率的较大主值在开始啮合点附近增大,而终止啮合点附近减小。

(3)当齿数差增加时,诱导法曲率的较小主值将变小,而较大主值将变大。

(4)当模数增加时,诱导法曲率的较小主值增加,而较大主值减小。

参 考 文 献

- 1 Litvin F L, Zhang Y, Wang J C. Design and geometry of face-gear drives. Transactions of ASME, Journal of Mechanical Design, 1992, 114: 642~647
- 2 Litvin F L, Wang J C, Bossler R B. Application of face-gear drives in helicopter transmission. Transactions of ASME, Journal of Mechanical Design, 1994, 116: 672~676
- 3 Litvin F L, Chen N X, Chen J S. Computerized determination of curvature relations and contact ellipse for conjugate surfaces. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1995, 125: 151~170
- 4 朱如鹏,潘升材,高德平. 面齿轮传动的特点及啮合原理. 见:中国航空学会第九届机械动力传输学术会议论文,江西九江,1998
- 5 吴序堂. 齿轮啮合原理. 北京:机械工业出版社,1982. 231~249
- 6 许有信. 计算机辅助设计与制造的几何基础. 南京:江苏科学技术出版社,1992

Study on Tooth Surface Curvature for Orthogonal Face-Gear Drives

Lu Wenlong Zhu Rupeng Zeng Ying

(Department of Mechanical Engineering,
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics Nanjing, 210016)

Abstract The tooth surface curvature has important influence on the capability of gear transmission, and it is an important parameter to weigh the quality of gear transmission. Thus, to study tooth-surface-curvature is significant. However, from the published information, the curvature of face-gear drives hasn't been well studied until now. Based on the knowledge of differential geometry, a method for calculating principal curvature and principal directions for face-gears is established, and thus the principal values of induced normal curvature are acquired. Corresponding programs are developed. Examples are given and the influence on curvature of main parameters is analysed. The calculating results are useful for strength analysis and calculations of face-gear drive.

Key words: mechanical drives; face gears; gear curvature; strength



陶 峰

文章编号:1003-8728(2000)06-0991-02

螺栓连接件的微动损伤及其涂胶防护试验研究

陶 峰,张 雨,刘正坝,戴振东

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

摘要:通过试验分析,提出了螺栓联接件的两种不同类型的疲劳破坏形式,即孔口应力集中破坏和微动疲劳破坏,并研究了不同的螺栓预紧力矩对螺栓联接件微动损伤的影响情况。试验结果表明,螺栓预紧力矩大小的改变会引起螺栓联接件不同程度的微动损伤,而在联接板面间进行涂胶防护是防止其产生微动损伤的一种较好的方法。最后对涂胶和未涂胶两种螺栓联接件的微动振幅、板面应力、以及由于微动摩擦而产生的板面温升等参数进行了对比测试,得出了初步的结论。

关键词: 螺接件; 激励损伤; 预紧力矩; 涂胶保护

中图分类号:TH131.3 文献标识码:A

157

螺栓联接是飞行器上一种最常见的联接形式,如飞机机身与机翼蒙皮之间,机翼大梁与衬板之间等都采用螺栓联接,在振动或变载荷作用下,这种接头很容易出现微动和微动损伤,引发疲劳裂纹。因而对它的联接强度的研究是很有必要的。

影响螺栓联接件微动疲劳强度的因素很多,其中螺栓预紧力矩是一个重要的因素,因为它的大小会影响到联接面间的应力、振幅以及其他一些参数的大小,而这些参数直接决定了微动损伤的程度^[1],目前有关这方面的研究还较少。本文以飞机中常用的铝合金为研究对象,通过试验,研究了在不同的螺栓预紧力矩下,螺栓联接件的微动损伤情况,以及它的涂胶保护效果,并且测试了螺栓联接板面间的微动振幅、温升等参数,得到了初步的结论。

螺栓联接微动损伤试验及其涂胶防护效果研究

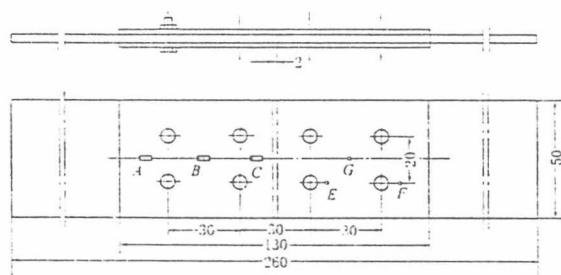


图 1 试验件的几何尺寸

试验用螺栓联接件的几何结构尺寸如图 1 所示,其中搭接板和盖板材料均为 LY12CZ,其化学成分为:1.54% Mg, 0.58% Mn, 4.61% Cu, 0.29% Fe, 0.26% Si, 0.1% Zn, 机械性能为 $\sigma_b = 452\text{MPa}$, $\sigma_s = 348\text{MPa}$, $\delta = 19.4\%$, $E = 0.72 \times 105\text{MPa}$ 。螺栓的公称直径为 6mm,材料为 30CrMnSiA 钢,它与孔的配合形式为间隙配合。试验设备为 PW3-10 型高频试验机,试验条件为:交变载荷、频率 $f = 122\text{Hz}$,最大拉力 $P_{\max} = 0.9$ 吨,载荷比 $R = 0.1$,循环次数 $N = 2 \times 10^5$ 次,试验在室温、大气中进行。

根据前期的研究^[2],对于间隙配合的螺栓联接件,当螺栓预紧力矩较小而不足以阻止联接板面间整体相对滑移时,被联接件的破坏裂纹起始于螺栓孔与交变载荷相垂直的孔口上,它表现为孔口应力集中破坏形式,这时联接件在很少的应力作用次数下即会发生断裂破坏。因而本试验所采用的三种螺栓预紧力矩为 $6.86 \text{ N} \cdot \text{m}$ 、 $9.8 \text{ N} \cdot \text{m}$ 、 $12.74 \text{ N} \cdot \text{m}$,在这三种力矩下,被联接板面间不会产生整体相对滑移,而且螺栓也不会因预紧力过大而发生破坏。

1.2 试验结果观察

当螺接件的盖板与对接板表面未涂胶时,由试验结果观察到,试件的损伤主要发生在盖板与对接板的接触表面上,属于微动损伤。微动损伤的区域位于螺孔周围的圆环区域内,该区域对应于预紧应力的作用区,即圆形垫片的预紧区。联接板在孔口边缘处的磨损很小,且呈现出原有的金属色,在圆环区的外边缘则有黑色微动斑产生,当损伤较严重时,在损伤区的表面会留下较深的点蚀坑。对比三种螺栓预紧力矩下板的损伤程度,可发现当力矩为 $6.36\text{N}\cdot\text{m}$ 和 $12.74\text{N}\cdot\text{m}$ 时,板面的损伤较严重,所产生的黑色微动斑

收稿日期:1999-10-13

基金项目:江苏省应用科学基金资助项目(B197025)

作者简介:高 峰(1955—),男(汉族),安徽来安县人,南京航空航天大学讲师,在职博士生。

多,且在圆环区的边缘有点蚀坑产生,其中在 $6.86\text{N}\cdot\text{m}$ 力矩下,对接板在点蚀坑内产生了疲劳裂纹;而力矩为 $9.8\text{N}\cdot\text{m}$ 时,板面间的黑色微动斑少,且无点蚀坑与疲劳裂纹产生,这表明螺栓预紧力矩对螺栓件的微动损伤有较大的影响。图2为三种力矩下,孔口周围的微动损伤状况。

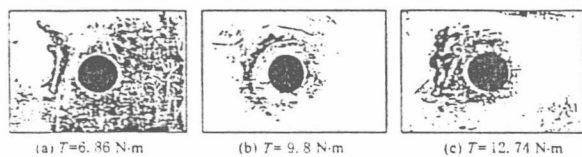


图2 板孔周围微动损伤状况

减小螺栓联接件微动损伤的方法有多种,当不要求拆卸联接件时,可在联接板面间进行涂胶防护。本试验采用的涂层胶为XM15密封胶,它是一种低温固化胶,常用于飞机结构中的各种板金粘接和嵌缝密封。在试验中,用CTS-23型超声波缺陷检测仪配以10N6探头对接接件的结构完整性进行了监测。在胶接结构中,胶层的特性层阻抗比铝板小一个数量级,而又远大于空气的阻抗,若胶与板产生脱层或胶层发生断裂则在破坏处会产生较强烈的反射波。监测的结果表明,在上述三种螺栓预紧力矩及试验条件下,未观察到有异常波出现,也即胶层并未发生剥落或剪切疲劳破坏,而联接板面也因受密封胶保护而无微动损伤发生。可见螺栓联接件采用涂胶保护是防止微动损伤发生的一种较好的方法。文献[3]根据飞机中胶螺结构件的实际使用情况指出,在联接接头防腐保护良好的条件下,胶螺结构件的寿命可达二、三十年以上。

2 涂胶与未涂胶螺栓件的微动参数对比测试

2.1 微动振幅与板面应力测试

对于螺栓联接件,它的微动振幅为联接板在外加交变载荷作用下的相对弹性变形量,其大小反映了构件中所受应力的情况,微动振幅大,则板内的拉应力就大,对板的疲劳强度影响也大。因此试验测试了在上述三种螺栓预紧力矩作用下试件的微动振幅,所测量的振幅是盖板边缘处,对接板与盖板之间沿微动方向的相对位移幅度,即螺栓件的最大微动振幅。其测试装置如图3所示。

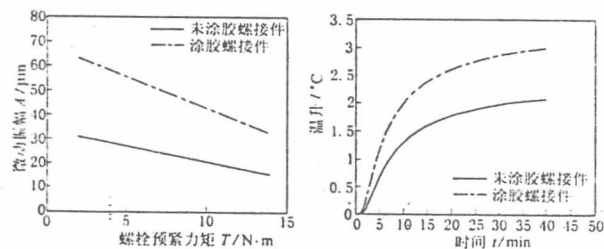


图3 测试装置示意图

当盖板与对接板边缘处发生微动时,弓形架产生变形,从而导致贴在弓形面上的电阻应变片产生应变,再经电子示波器产生一动态波形,波形的幅度即可反映微动振幅的

大小。图4表示了两种螺栓件的微动振幅与预紧力矩之间的关系,由图可见,螺栓件的微动振幅与螺栓预紧力矩成反比关系;在同一力矩下,涂胶螺栓件的微动振幅要比未涂胶螺栓件的大。为了反映在外载作用下,联接板内的拉应力随预紧力矩的变化情况,试验在图1所示的位置,用应变片测试了盖板上沿板长方向A、B、C三点的应力值,测试结果可见表1。从表中可看出,螺栓件盖板中的拉伸应力随预紧力矩的增大而减小,这与微动振幅的测量结果是相符的;而在同一预紧力矩下,联接面涂胶的螺栓件其板内拉伸应力比未涂胶的要小,这说明涂胶螺栓件的微动主要是由胶层的弹性变形组成,而板的弹性变形却很小,因而涂胶的螺栓件有利于减小联接板中的应力,提高联接强度。

表1 板面应力/MPa

预紧力矩/ $\text{N}\cdot\text{m}$	$T=6.86\text{N}\cdot\text{m}$	$T=9.8\text{N}\cdot\text{m}$	$T=12.74\text{N}\cdot\text{m}$
A点	86.1	80.4	75.6
B点	49.5	48.1	46.7
C点	3.5	3.3	2.5
A点	74.8	72.5	70.6
B点	46.2	44.7	42.9
C点	2.3	2.1	1.8

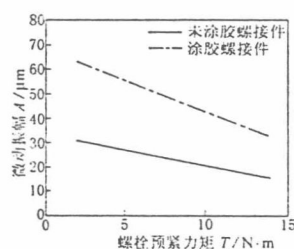


图4 微动振幅随预紧力的变化

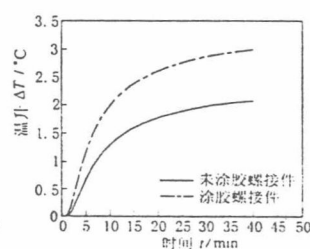


图5 温升随时间的变化

2.2 微动摩擦面的温度测试

有文献表明^[4],在某些微动条件下,微动摩擦面间会产生几百度的高温。温度的升高会影响构件材料的微动疲劳性能,对于胶接结构件,它还会影响到胶的胶接性能,为此试验用热电偶温度计测试了螺栓件微动摩擦面间的温度变化情况,测试点为微动损伤较大的圆环区边缘E、F点,及半边盖板上四个螺栓的中心点G点,其位置如图1所示。测试时在盖板的测试点处透钻直径为1mm的小孔,以便使热电丝可通过盖板与对接板相接触。对螺栓试件的测试表明,螺栓预紧力矩的变化对螺栓件摩擦面的温升影响很小,而且由于铝合金良好的导热性能,试件上E、F、G点的温升也极为接近。文中取G点在上述三种力矩下板面的平均温升进行数据处理,得到了温升随时间变化的曲线图,如图5所示。从温度的实测结果来看,螺栓试件的接触面间因微动而产生的温升不高,在板面未涂胶和涂胶两种情况下,板面温升在微动摩擦约四十分钟后达到平衡,其稳定值分别为2℃和3℃,由于螺栓联接件因微动摩擦而产生的温升并不高,因而它对联接板件和胶的影响不大。

(下转第997页)

Modeling[J]. CAD, 1994, 26(6): 435~451

- [8] Taylor L E. Meta-physical Product Modeling[D]. Arizona State University, 1993
- [9] James A. Fulton. Technical Report on the Semantic Unification Meta-Model, Volume 1: Semantic Unification of Static Models[S]. ISO TC184/SC4 N175, Oct 19, 1992

Research on Product Modeling for VM——PDU & Metamodeling- centered Product Model

ZHANG Ling, WANG Xin-long,
XIAO Tian-yuan, HAN Xiang-li

(National CIMS ERC, Tsinghua University, Beijing 100084)

(上接第 992 页)

3 结论

(1) 间隙配合的螺栓联接件的疲劳破坏形式有两种:当螺栓的预紧力矩小,联接板面间在外载的作用下整体滑移时,其破坏形式为孔边应力集中破坏;当螺栓的预紧力矩大,而使联接板面间无整体相对滑移时,其破坏形式为微动疲劳破坏,而且预紧力矩的大小对微动损伤的程度有很大影响。

(2) 在螺栓件接触板面间涂胶可以很好地防止微动损伤的产生,其联接疲劳强度与胶的性能及胶接接头的保护有很大关系。

(3) 螺栓联接件因微动而产生的温升不高,它对材料的微动疲劳性能及胶的胶接性能影响不大。

[参考文献]

- [1] 李东紫. 微动磨损与防护技术[M]. 西安:陕西科学技术出版社, 1992
- [2] 袁海平. 螺栓拧紧力矩对 LY12CZ 铝合金板材螺栓件微动损伤失效特性和疲劳寿命的试验研究[D]. 南京航空航天大学, 1993
- [3] 郭忠信等. 铝合金结构胶接[M]. 北京:国防工业出版社, 1993
- [4] Waterhouse R B. Fretting Corrosion[M]. New York: Pergamon Press, 1972

Abstract: Virtual Manufacturing (VM) demands information in the product model to be consistent and reusable in the multidisciplinary, seamlessly integrated simulation. Unfortunately, traditional product model can not guarantee this. To meet these demands, we use PDU to build product design model, which is composed of three levels of PDUs——feature PDUs, part PDUs and assembly PDUs, and employ SUMM-based metamodeling technology to realize model interoperability. Thus other application models can be derived from the product design model easily. Semantic shortage is then solved and good consistency, extendibility and reusability are obtained.

Key words: VM (Virtual Manufacturing); Product modeling, PDU (Product Definition Unit), Metamodeling

A Test Research on Fretting Damage of Bolted Joint and Its Coating Glue Protection

TAO Feng, ZHANG Yu, LIU Zheng-xun,
DAI Zhen-dong

(Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,
Nanjing 210016)

Abstract: Two kinds of different fatigue failure modes about bolted joint is presented in this paper through experiment, the effects of different bolt tightening torque on bolted joint are researched. The experiment results show that different volume of bolt tightening torque will cause an change in fretting damage degree for bolted joint, and coating glue on its faying surface will be a good method to protect bolted joint from fretting damage. Finally, for bolted joint with glue and without glue, tests are made for comparison of some parameters such as fretting surface stress and temperature raising produced by fretting friction, elementary conclusions are obtained.

Key words: Bolted joint; Fretting damage; Tightening torque; Coating glue protect

用模糊综合评判法评估薄壁容器的寿命

陶 峰 欧阳祖行 刘正坝

(南京航空航天大学机电工程学院 南京, 210016)

摘要 针对影响薄壁密封容器寿命的许多因素具有复杂性、非确定性以及时变性的特点,提出了用动态二级模糊综合评判的方法对其寿命进行评估,建立了评估的数学模型和评估流程。在对飞机整体油箱的寿命分析中,考虑到保留所有评判因素的影响,采用了乘、加型模糊算子,并用层次分析(AHP)法来确定评价指标权重。计算结果表明,该方法能够解决油箱寿命评估中一些复杂因素的处理问题,具有一定的实际工程意义。

关键词: 微动磨损; 寿命; 模糊综合评判

中图分类号: TH117.1; N945.16

引 言

航空、航天、化工、石油、核工业等领域普遍使用大型薄壁容器,以贮存或携带必要的液(气)体原料或燃料,例如飞机上的整体油箱等。这种大型薄壁容器大多是由薄板材,用铆(螺)接成,板件之间涂有密封胶。工作时容器外部受多向振动载荷,并有潮湿、腐蚀气体介质包围,容器内部又有一定的内压力,在这些复杂因素的作用下,如果设计、制造不当或超期服役等,就会造成液(气)体渗漏,酿成事故和损失。根据密封容器的实际使用情况,产生渗漏的原因主要是在复杂工况,特别是在振动外载的作用下,容器的接触板面之间产生了微动和微动磨损,从而产生磨损间隙,影响配合,造成渗漏。

影响容器微动疲劳寿命的因素有多种^[1,2],其中有些因素如接触压应力、微动振幅等对寿命的影响可以用力学分析的方法定量地表示出来,不少学者对此曾作出过研究^[3,4]。而大多数因素,如容器的运行环境、受力状态以及密封胶的性能等,由于其复杂性和不确定性,影响作用难以量化、数学化。而若忽略掉这些因素的影响会给分析结论带来较大的偏差,甚至无意义。为了解决这一难题,本文根据薄壁密封容器实际使用情况,对它的寿命问题提出了用动态二级模糊综合评判法进行评判,建立了评判的数学模型,计算了飞机整体油箱的寿命,并对计算结果进行了分析。

* 江苏省应用科学基金(编号:BJ97052)资助项目。

收稿日期:1999-07-15;修改稿收到日期:1999-09-30

第一作者:陶 峰,男,讲师,1965年5月生。

1 薄壁密封容器寿命的动态二级模糊综合评判方法

常用的模糊综合评判方法,很少考虑评判对象的特性值随时间变化的情况,而是把评价指标作为常量进行评价,这种评判方法在评判密封容器寿命时是不适用的。由于容器的板材很薄,微动裂纹的萌生与扩展时间很短,因而微动磨损的速率对容器整个寿命影响很大。根据 Feng 和 Rightmir 的观点^[2],通常可将微动磨损速率和时间的关系描述为跑合、过渡、稳定三个阶段。而在这三个阶段中,由于影响微动损伤大小的各因素,其影响作用的程度是随时间变化的,因此有必要提出用动态的模糊综合评判法来评估容器的寿命问题,即把时间因素考虑在内。此外对于容器寿命这样复杂的问题,要考虑的因素很多,而且每一因素还有多个层次,用一级评判法得不出满意的结论,因而依据实际问题的需要采用了二级评判法,亦即动态二级模糊综合评判法。

1.1 动态二级模糊综合评判法的模型

1.1.1 评判中各类集合的建立

(1) 建立因素集和因素等级集

因素集是影响评判对象的各种因素所组成的一个普通集合,即 $\tilde{U} = \{u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_m\}$ 式中 $u_i (i=1, 2, \dots, m)$ 表示各种影响因素。对容器微动疲劳寿命有影响的因素有受力条件、温度、腐蚀介质等。

由于每一因素都具有不确定性,如容器的受力条件有好坏之分,温度也有高低之分,因而需要将各因素再细分为各个等级,即 $\tilde{U}_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{ij}, \dots, u_{in}\}$ 式中 u_{ij} 为第 i 个因素的第 j 个等级。对于工作中的容器,这两个集合的建立应根据容器的实际工况条件确定。

(2) 建立权重集

权重集是下层评判指标对上层评判指标的隶属程度,它是因素集上的模糊子集。对于容器寿命问题,由于建立了因素集和因素等级集,因而也必需建立因素权重集和等级权重集这两个权重集。设它们分别为 $\tilde{A} = \{a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_m\}$ 和 $\tilde{A}_i = \{a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ij}, \dots, a_{in}\}$, 式中 a_i 为第 i 个因素的权数, a_{ij} 为第 j 等级对因素 a_i 的隶属度。为了方便计算,权数值应满足非负性及归一性要求。

(3) 建立评断集

设评断的结果可能有 K 个,则由其组成的评断集为 $\tilde{V} = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$ 。对于所考虑的问题,可表示为诸多非确定性因素对容器微动疲劳寿命的影响程度。

(4) 建立单因素等级评判矩阵

先进行单因素评判,即单独从一个评判因素出发,确定评判对象对因素等级的隶属度。由于引入了动态模糊评判法进行寿命评判,故需引入离散时间参数 t 。若以 r_{ijk}^t 表示在 t 时间里,第 i 个因素等级中第 j 个等级 u_{ij} 对评断集的隶属度。则第 i 个因素在 t 时的等级评判矩阵为

$$R_i^t = \begin{bmatrix} r_{i11}^t & r_{i12}^t & \cdots & r_{i1k}^t \\ r_{i21}^t & r_{i22}^t & \cdots & r_{i2k}^t \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{in1}^t & r_{in2}^t & \cdots & r_{ink}^t \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, m)$$

以上各类因素权重集及单因素等级评判矩阵的确定是综合评判的关键,它们确定得是否恰当直接影响到评判结果。因此在确定权数和隶属度时必须用数学的方法对它们进行“滤波”和“修复”处理,以尽量消除主观成分。常用的权数和隶属度确定方法有德尔斐(Delphi)法、专家估测法、层次分析法(AHP法)等^[5],使用时应根据具体情况选用。

1.1.2 动态二级模糊综合评判法的分析过程

(1)合成算子的确定 常用的模糊综合合成运算模型有4种,为了顾及所有评判因素的影响且保留单因素评判的全部信息,文中采用了乘、加模型 $M(\cdot, \oplus)$ 。当权数集与隶属度向量均具有归一性时,上述的运算模型即为求和型 $M(\cdot, +)$ 。

(2)初级评判 即按每个因素的各个等级进行评判。在确定单因素评判矩阵 R_i 时,由于考虑到时间对它的影响, R_i 应由各时间段的 R_i^t 综合确定。即 $R_i = \sum_t w_i^t \sum_j a_j r_{ij}^t$,式中 w_i^t 为考虑不同时间的权重,它反映了对不同时间利益的重视程度。 w_i^t 也应满足非负性和归一性要求。初级评判集为

$$\tilde{B}_i = A_i \cdot R_i = [a_{i1} \ a_{i2} \ \dots \ a_{in}] \begin{bmatrix} r_{i11} & r_{i12} & \dots & r_{i1k} \\ r_{i21} & r_{i22} & \dots & r_{i2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{in1} & r_{in2} & \dots & r_{ink} \end{bmatrix} = [b_{i1} \ b_{i2} \ \dots \ b_{ik}] \quad (1)$$

式中: b_{ik} 为按第 i 个因素的全部等级进行综合评判时,评判对象对判断集中第 k 个元素的隶属度。

(3)二级评判 即考虑到所有因素进行综合评判。它的运算为

$$\tilde{B} = [A] \cdot \begin{Bmatrix} \tilde{B}_1 \\ \tilde{B}_2 \\ \vdots \\ \tilde{B}_m \end{Bmatrix} = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_m] \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1k} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \dots & b_{mk} \end{bmatrix} = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_k] \quad (2)$$

式中: b_k 为按全部因素的全部等级进行综合评判时,评判对象对判断集中第 k 个元素的隶属度。

1.2 评判结论

评判的结果按加权平均法处理,则经过动态二级模糊综合评判,最后所得的评估寿命为

$$\tilde{L} = \sum_{i=1}^k b_i v_i / \sum_{i=1}^k b_i \quad (3)$$

2 飞机整体油箱寿命的动态二级模糊综合评判

飞机整体油箱是一种由金属薄板材如铝板、钢板用紧固件加密封胶联接而成的容器,它的工况条件相当复杂,在联接接头处不仅承受拉压、剪切等静载荷,还经常受到冲击、振动等动载荷作用。油箱的工作温度一般为 $-54 \sim 120^\circ\text{C}$,而局部最高温度可达 250°C ,工作压力为 $0 \sim 7 \text{ MPa}$;此外油箱还可能处于腐蚀介质、紫外线辐射以及热氧老化等恶劣的环境中工作。因而在分析它的寿命时,必须把这些因素考虑进去。以下用动态的二级模糊综合评判法