

齿轮传动装置初步设计阶段可靠度预计

裘大成 (哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所)

〔摘要〕 对在初步设计阶段的舰船齿轮传动装置可靠度预计中的若干问题进行了探讨,并介绍了舰船CODOG 齿轮传动装置可靠度预计的实例。

关键词 齿轮传动 初步设计 可靠度预计

1 前言

舰船齿轮传动装置具有价值昂贵,研制周期长,工艺复杂,单件生产的特点。在初步设计阶段,常采用具有运行经验类似的设备作为参考母型,以供结构选择、许用强度和理论计算数据核校的参考和借鉴,从而减少部件试验内容、降低成本和提高设备的可靠性。在初步设计阶段利用参考母型的有关数据,进行可靠性分析计算求出新研制设备的可靠度预计值是切实可行的方法之一。现对舰船齿轮传动装置在初步设计阶段的可靠度预计中的若干问题进行探讨。

2 零件可靠度

受力零件的可靠度可由强度应力干涉理论和其连系方程来决定,设强度(S)、载荷(L)均为随机变量,概率密度函数为 $f(s)$ 、 $g(l)$,则可靠度实质上就是受力零件的强度与负荷的相互干涉,强度比负荷大的概率。即

$$\begin{aligned} R &= P(S \geq l) = P(S - L) > 0 \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} g(l) \left[\int_L^{\infty} f(s) ds \right] dl \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} G(l) f(s) ds \end{aligned}$$

若强度与负荷均服从正态分布,则

$$\begin{aligned} f(s) &= \frac{1}{2\pi\sigma_s} \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{S - \mu_s}{\sigma_s} \right)^2 \right] \right\}_{-\infty < s < \infty} \\ g(l) &= \frac{1}{2\pi\sigma_L} \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{L - \mu_L}{\sigma_L} \right)^2 \right] \right\}_{-\infty < L < \infty} \end{aligned}$$

式中的 μ 和 σ 均为相应的平均值和标准差。

引入新的随机变量 $Y = S - L$, 则 Y 亦服从正态分布

$$h(Y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_r} \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{Y-\mu_Y}{\sigma_r}\right)^2\right] dY \right\}$$

式中 $\mu_Y = \mu_S = \mu_L$ $\sigma_Y = \sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_L^2}$

则零件的可靠度

$$R = P(Y \geq 0) = \int_0^{\infty} h(Y) dY$$

或

$$R = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{H_1}^{\infty} \exp\left(-\frac{H^2}{2}\right) dH$$

式中 H 为正态标准变量,

H_1 为积分下限 $H_1 = \mu_Y / \sigma_Y$

现分别讨论齿轮零件可靠度与轴承零件可靠度。

2.1 齿轮零件可靠度

2.1.1 齿轮抗弯曲折断与抗接触疲劳损坏可靠度

轮齿承受负荷所产生应力按通常计算方法进行计算。

$$\text{弯曲应力 } \mu_{Lb} = \frac{\beta M}{AB}$$

$$\text{接触应力 } \mu_{Lw} = \frac{\gamma}{A} \sqrt{\frac{M}{B}}$$

式中

$$\beta = \frac{K_f K_v (i \pm 1)}{i m \cos \alpha_u}$$

$$\gamma = 0.59 \left(\frac{i \pm 1}{i} \right) \left[\frac{(i \pm 1) E K_f K_v}{\sin 2\alpha} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$M = 97\,500 \frac{TK_H}{nq}$$

B 齿宽	A 中心距
i 传动比	m 模数
n 转数	V 圆周速度
T 传递功率	M 扭矩
α 压力角	K_f 应力集中系数
u 齿形系数	K_v 动负荷系数

E 弹性模量	q 功率分流数
下标	
1 第一级	2 第二级
b 抗弯曲	W 抗接触

许用强度 $[\mu_{sb}]$ 、 $[\mu_{sw}]$ 按参考母型确定，以上应力和许用强度均为正态分布函数，在可靠度的分析计算中，关键是确定波动系数，即

标准差 $\sigma = \text{均值} \mu \times \text{波动系数} c$

波动系数对互为独立多维随机变量有如下关系式

$$\text{对 } z(x \cdot y) = x \cdot y \quad c_z^2 = c_x^2 + c_y^2 + c_x^2 c_y^2$$

$$\text{对 } z(x \cdot y) = \frac{x}{y} \quad c_z^2 = c_x^2 + c_y^2 / 1 + c_y^2$$

则得

$$c_M^2 = \frac{c_i^2 + c_n^2}{1 + c_n^2}$$

$$c_{Lb}^2 = \frac{c_b^2 + c_A^2 + c_M^2}{1 + c_A^2 + c_b^2}$$

$$c_{LW}^2 = \frac{c_b^2 + c_M^2 + 4c_A^2}{4 + c_M^2 + 4c_A^2}$$

转速波动取四档 1% 2% 3% 4%

即 $c_n = 0.01 \quad 0.02 \quad 0.03 \quad 0.04$

功率波动取两档 5% 10%

即 $c_T = 0.05 \quad 0.10$

C_A 、 C_B 决定于加工精度。

据此可以计算出 C_M 、 C_{Lb} 、 C_{LW} 、 σ_{Lb} 、 σ_{LW} ，从而求得轮齿抗弯与抗接触损坏可靠度。

2.1.2 轮齿抗擦伤可靠度

用啮合齿轮对粗糙面接触概率代替抗擦伤可靠度是比较安全的，因此可以按以下方法根据设计选定的轮齿精度等级进行计算，即

$$P(\text{擦伤}) \leq P(\text{粗糙面接触})$$

$$P(\text{粗糙面接触}) = P(\Delta h \leq 0)$$

$P(\text{粗糙面接触})$ 亦为正态分布函数

则得

$$P(\Delta h \leq 0) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{1}{2}} \sigma_A} \int_0^{\infty} \exp \left[-\frac{(-\Delta h)^2}{2\sigma_A^2} \right] d(-\Delta h)$$

式中

$$\Delta h = \bar{h} - h_1 - h_2$$

$$\bar{h} = h - \bar{x}_{\rho_1} - \bar{x}_{\rho_2}$$

$$\sigma_A = (\sigma_{\rho_1}^2 + \sigma_{\rho_2}^2)^{\frac{1}{2}}$$

$\bar{x}_{\rho 1}, \bar{x}_{\rho 2}$ 为粗糙面尖峰高度平均值

$\sigma_{\rho 1}, \sigma_{\rho 2}$ 为粗糙面尖峰标准偏差

\bar{h} 为两粗糙面尖峰平均线间距离

Δh 为两粗糙面尖峰间间隙

h_1, h_2 为粗糙面尖峰高度

h 为按弹性流体动力润滑理论计算所得啮合齿轮对齿面油膜厚度

2.2 轴承零件可靠度

轴承零件与齿轮零件不同,在舰船运行机舱内允许更换轴承,应考虑可维修性影响,可应用马尔科夫过程的原理计算轴承可靠度。以 $S(1)$ 为轴承完好状态, $F(2)$ 为轴承磨损损坏状态,则 P_{12} 为从状态 $S(1)$ 转移到 $F(2)$ 的概率,即失效率 λ , P_{21} 为经过更换新轴承从状态 $F(2)$ 转移到 $S(1)$ 的概率,即可修复率为1, P_{22} 为不能修复的概率为零, P_{11} 为完好率等于 $1-\lambda$,以上状态的转移可用以下概念矩阵表示:

$$P = \begin{matrix} S & \{ P_{11} & P_{12} \} \\ F & \{ P_{12} & P_{22} \} \end{matrix}$$

即

$$P = \begin{matrix} S & \{ 1-\lambda & \lambda \} \\ F & \{ 1 & 0 \} \end{matrix}$$

求特征向量值得:

$$X_1 = \frac{1}{1+\lambda} \quad X_2 = \frac{\lambda}{1+\lambda}$$

式中: X_2 为考虑可维修性后轴承可靠度增加值。

3 齿轮传动装置可靠度

齿轮传动装置为一系统,系统的可靠度取决于两个因素,一是零件本身的可靠度;二是它们结合起来的形式。零件结合的基本形式有两种,即串联系统与并联系统。设系统失效时间随机变量为 Y ,各零件相应值为 Y_i ,则串联系统可靠度数学模型为

$$R_S(Y) = \prod_{i=1}^n R_{S_i}(Y)$$

并联系统为

$$R_P(Y) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_{P_i}(Y)]$$

舰船齿轮传动装置均为串并联复合系统,据此,按传动线图建立框图与相应数学模型,即可求得可靠度设计值。

4 某舰CODOG齿轮传动装置可靠度预计实例

4.1 传动线图 (见图 1)

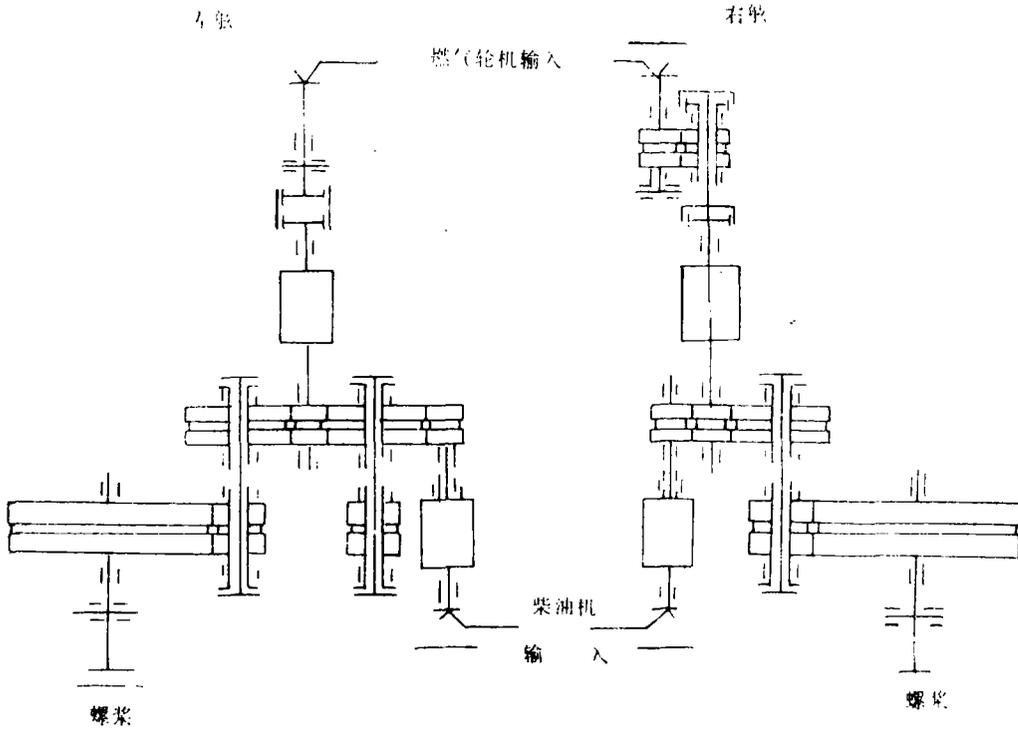


图 1

4.2 框图

右舷框图 (见图 2)

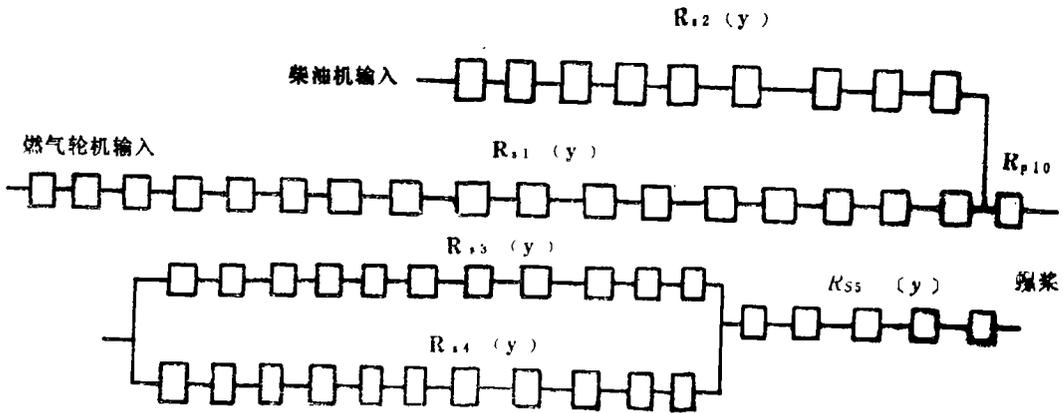


图 2

左舷框图 (见图 3)

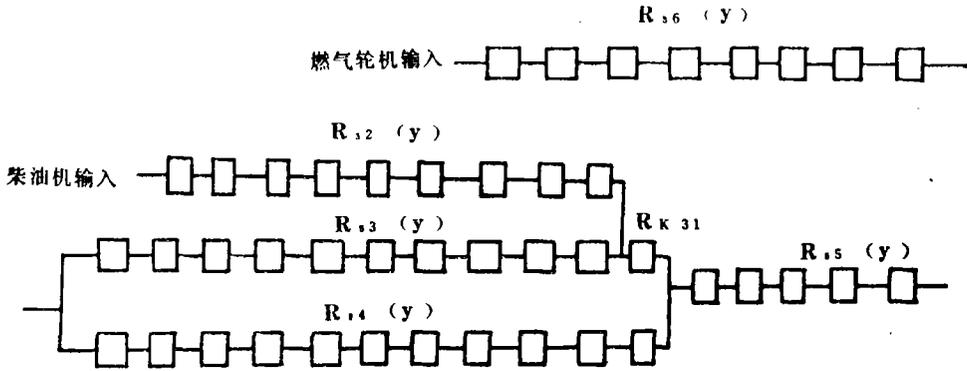


图 3

4.3 数学模型

右舷传动轮系可靠度:

燃气轮机运行工况为

$$R_{\text{轮系右燃}}(Y) = R_{S1}(Y) \{ [1 - (1 - R_{S3}(Y))(1 - R_{S4}(Y))] R_{S5}(Y) \}$$

柴油机运行工况为

$$R_{\text{轮系右柴}}(Y) = R_{S2}(Y) R_{P10} \{ \}$$

左舷传动轮系可靠度:

燃气轮机运行工况为

$$R_{\text{轮系左燃}}(Y) = R_{S6}(Y) \{ \}$$

柴油机运行工况为

$$R_{\text{轮系左柴}}(Y) = R_{S2}(Y) \cdot R_{k31} R_{S5}(Y)$$

4.4 计算结果

右舷轮系可靠度预计值

$$R_{\text{轮系右燃}}(Y) \approx 0.9811$$

$$R_{\text{轮系右柴}}(Y) \approx 0.9752$$

左舷轮系可靠度预计值

$$R_{\text{轮系左燃}}(Y) \approx 0.9806$$

$$R_{\text{轮系左柴}}(Y) \approx 0.9786$$

参 考 文 献

- 1 袁大成. 某艇舰空型行星减速器可靠度分析. 热能动力工程, 1986(3)
- 2 某航CODOG齿轮传动装置可靠性设计. 哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所资料, 1989年

The Reliability Prediction of a Gear Transmission unit at the Preliminary Design Stage

Qiu Dacheng

(Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute)

Abstract

The author has made an exploratory study of some issues related to the forecast of marine gear unit reliability at the preliminary design stage with a practical example being given of the CODOG gear unit reliability prediction.

Key words: *gear transmission, preliminary design, reliability forecast*

(孙显辉 编辑)

(上接第156页)

A Study of Venturi Burner for Use in Industrial Boilers

Fan Zhonghua

(Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute)

Abstract

Described in this paper are the design features of a venturi burner and its application in industrial boilers. The test results have shown that the said burner capable of firing oil and gas independently is a ideal one with significant energy saving potentialities.

Key words: *oil-gas burner, air regiser, oil sprayer*