

确定船用蒸汽动力装置辅机余度系数的新方法

舒礼伟¹, 金家善¹, 冀光²

(1. 海军工程大学 动力工程学院, 湖北 武汉 430033; 2. 哈尔滨汽轮机厂有限责任公司军代表室, 黑龙江 哈尔滨 150046)

摘要: 以汽轮给水泵为例, 探讨了确定船用蒸汽动力装置辅机额定性能余度系数的方法, 该方法综合考虑设备制造时额定性能的离散性、额定性能随使用时间的退化规律和系统对设备要求的离散性等因素, 利用性能可靠性作为指标, 使余度系数的确定更加合理, 可以用于指导船用汽力装置热线图设计, 也可以指导其它类似的设备选型。

关键词: 性能可靠性; 退化; 余度系数; 船用蒸汽动力装置; 汽轮给水泵

中图分类号: U664.11 文献标识码: A

1 问题的提出

设备的技术性能, 如功率、效率、排量、扬程、传热系数等, 由于磨损、腐蚀、污染、老化等原因, 会随着工作时间的增长(包括储存和运输等因素)而退化, 工作能力下降, 从而达不到规定的要求。解决这一问题的有效措施之一是采用余度设计, 或称为能量储备^[1~2], 即在设计时, 选用额定性能指标比系统的要求高一些的设备, 以保证在设备经历一段时间的使用和退化后, 剩余的技术性能仍然能满足需要。在海洋船舶动力装置中, 也采用了这一设计思想, 尤其对于重要的辅助机械, 通常采用较大的余度。例如, 船用蒸汽动力装置主锅炉的汽轮给水泵, 在设计时, 其额定排量要求按下式计算:

$$Q = (1 + K) G_B$$

式中: Q —汽轮给水泵的设计排量; G_B —主锅炉的蒸汽产生量; K —汽轮给水泵的设计余度(能量储备)系数, 按照传统的设计惯例, $K = 0.3$ 。

实践证明, 这是保证装置性能可靠性的有效措施。但是, 装备性能参数的高配置要求意味着资金的高投入。此外, 过大的余度还将使设备的额定性能过高, 在设备正常工作时, 一直处于过低负荷的运行状态, 效率低。因而, 余度系数的确定, 必须依据设备额定性能离散性、额定性能随工作时间的退化规律以

及系统对设备的要求所服从的分布来确定。文中将以确定船用蒸汽动力装置汽轮给水泵的余度系数为例, 探讨确定设备余度系数的方法。

2 性能可靠性

2.1 设备性能的分布

由于设备设计、加工、装配、在船舶上的安装等过程中的随机因素, 使得设备的额定性能不是一个固定的数值, 而是一个服从某一分布的随机变量。对于汽轮给水泵, 可假定其额定排量 Q 为服从正态分布的随机变量:

$$Q \sim N(\mu_Q, \sigma_Q^2)$$

式中: μ_Q 、 σ_Q^2 分别为给水泵额定排量的均值和方差。

2.2 设备性能的退化

汽轮给水泵投入使用后, 由于各种因素, 使其额定排量持续地退化, 记额定排量均值退化规律的一般表达式为:

$$\mu_Q(t) = f_{Q1}(t)$$

据此可以得出, 当给水泵在船舶上安装完毕时, 其额定排量为 $\mu_Q(0)$ 。

同理, 可以得到其方差随运行时间的变化规律, 假定为:

$$\sigma_Q^2(t) = f_{Q2}(t)$$

由此可得, 在时刻 t , 给水泵的排量 Q 是服从参数为 $\mu_Q(t)$ 和 $\sigma_Q^2(t)$ 的正态分布的随机变量, 即

$$Q(t) \sim N[\mu_Q(t), \sigma_Q^2(t)]$$

2.3 设备性能可靠性

定义设备的性能可靠性是设备性能指标满足系统要求的概率。因此, 为研究设备的性能可靠性, 必须首先明确系统对设备的功能要求。而这一要求的确定, 通常来自于系统的功能设计, 对于船用蒸汽动力装置来说, 就是热线图设计。

2.3.1 锅炉的蒸发量

在确定汽轮给水泵的排量时, 首先需得知主锅炉的蒸发量要求。由于主锅炉本身设计与建造的原因以及动力装置中其它设备的影响, 主锅炉的蒸发量不可能是一个固定的数值, 而是一个服从某一分布的随机变量, 并且, 随着工作时间增长, 由于主汽轮机和汽轮给水泵等汽轮辅机组的性能退化, 耗汽量逐渐增加。因而, 主锅炉的蒸发量是一个随时间而变化(通常是增加)的随机变量。基于简化分析和计算的需要, 采用与给水泵类似的假定, 即假定锅炉的蒸发量服从参数随时间变化的正态分布, 可得:

$$G_B(t) \sim N[\mu_{G_B}(t), \sigma_{G_B}^2(t)]$$

式中 $\mu_{G_B}(t)$ 和 $\sigma_{G_B}^2(t)$ 分别为主锅炉的蒸发量的均值及方差随动力装置工作时间的变化规律, 一般表达式为:

$$\begin{aligned} \mu_{G_B}(t) &= f_{G1}(t) \\ \sigma_{G_B}^2(t) &= f_{G2}(t) \end{aligned}$$

2.3.2 设备性能可靠性初始值及余度系数

根据定义, 汽轮给水泵的性能可靠性可以用下式表达:

$$R = P(Q \geq G_B) \text{ 或 } R = P(Q - G_B \geq 0)$$

根据正态分布的性质, 汽轮给水泵的排量与主锅炉的蒸汽产生量之差也服从正态分布。令

$$\begin{aligned} \mu &= Q - G_B \\ \text{其平均值与方差为:} \\ \mu &= \mu_Q - \mu_{G_B}, \sigma^2 = \sigma_Q^2 + \sigma_{G_B}^2 \end{aligned}$$

即:

$$(Q - G_B) \sim N(\mu_Q - \mu_{G_B}, \sigma_Q^2 + \sigma_{G_B}^2)$$

因此, 汽轮给水泵的性能可靠性为

$$\begin{aligned} R &= P(Q - G_B \geq 0) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^{\infty} \exp\left[-\frac{(\mu - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] d\mu \\ \text{令} \\ t &= \frac{\mu - \mu}{\sigma}, u_0 = \frac{\mu}{\sigma} \end{aligned} \quad (1)$$

代入上式, 则有

$$\begin{aligned} R &= P(Q - G_B \geq 0) = P(\mu \geq 0) \\ &= \frac{1}{2} + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{u_0} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \end{aligned}$$

可见, 对于给定的性能可靠性要求 R , 有一个对应的 u_0 。实际上, u_0 就是正态分布下侧概率为 R 的分位点, 记该分位点为 $u_0(R)$ 。

另外, 根据前述的思想, 回顾汽轮给水泵额定排

量的设计公式, 可得

$$\mu_Q = (1 + K)\mu_{G_B}$$

即: $\mu = \mu_Q - \mu_{G_B} = K\mu_{G_B}$

再由式(1), 可得给水泵的余度系数为

$$K = \frac{\sigma \cdot u_0(R)}{\mu_{G_B}}$$

从而, 对应于一个给定的性能可靠性要求, 有一个对应的余度系数 K 。经计算, 可得 K 与 R 的关系如表 1 所示。

表 1 R 与 $u_0(R)$ 及 K 的关系

R	0.9	0.95	0.99	0.999	0.9999	0.99999
$u_0(R)$	1.28	1.65	2.33	3.09	3.72	4.26
K	$\frac{1.28\sigma}{\mu_{G_B}}$	$\frac{1.65\sigma}{\mu_{G_B}}$	$\frac{2.33\sigma}{\mu_{G_B}}$	$\frac{3.09\sigma}{\mu_{G_B}}$	$\frac{3.72\sigma}{\mu_{G_B}}$	$\frac{4.26\sigma}{\mu_{G_B}}$

由此可见, 在确定给水泵的余度系数时, 考虑的影响因素包括: 性能可靠性 R 要求、给水泵排量的方差 σ_Q^2 、锅炉蒸发量的均值 μ_{G_B} 及其方差 $\sigma_{G_B}^2$ 等因素。

2.3.3 考虑性能可靠性随时间的变化确定余度系数

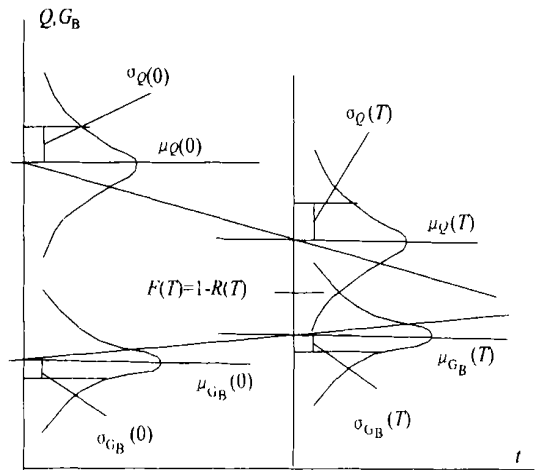


图 1 性能可靠性的演变过程

为简化分析, 假定汽轮给水泵的排量随工作时间呈线性退化, 即: $f_1(t) = a - bT$

在初始时刻 ($t = 0$) 和 T 时刻 ($t = T$), 有

$$\mu_Q(0) = a = (1 + K)\mu_{G_B}(0)$$

$$\mu_Q(T) = a - bT = (1 + K)\mu_{G_B}(0) - bT$$

假设船舶的中修期是 T , 即在 T 时刻, 对汽轮给水泵进行翻修, 使其修复如新。由汽轮给水泵的退化规律和锅炉的上水量要求的变化规律可知, 在翻修

前, 给水泵的性能可靠性最低, 如图 1 所示。当给定了此时的性能可靠性后, 就可得到在设计给水泵时, 应该采用的余度系数。

如前所作假设, 在 T 时刻:

$$\mu(T) = Q(T) - G_B(T), \mu(T)$$

$$= \mu_Q(T) - \mu_{G_B}(T),$$

$$\sigma^2 = \sigma_{G_B}^2(T) + \sigma_Q^2(T)$$

为保证 T 时刻主锅炉的给水需求, 汽轮给水泵的排量与主锅炉的蒸发量之差应大于或等于零, 即:

$$\mu(T) = Q(T) - G_B(T) \geq 0$$

因此, 汽轮给水泵的性能可靠性为:

$$R = P[Q(T) - G_B(T) \geq 0]$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(T)} \int_0^\infty \exp\left\{-\frac{[\mu(T) - \mu(T)]^2}{2\sigma^2(T)}\right\} d\mu(T)$$

与初始状态分析相同的, 令

$$t = \frac{\mu(T) - \mu(T)}{\sigma(T)}, u_0 = \frac{\mu(T)}{\sigma(T)}$$

代入上式, 可得

$$R = P[Q(T) - G_B(T) \geq 0]$$

$$= \frac{1}{2} + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{u_0} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

同样, 上式中 u_0 即正态分布的分位点 $u_0(R)$, 对于一个给定的 R , 可以求出其对应的 $u_0(R)$, 从而求出不同的余度系数 K 。由

$$u_0 = u_0(R) = \frac{\mu(T)}{\sigma(T)}$$

得

$$\mu(T) = \mu_Q(T) - \mu_{G_B}(T) = a - bT - \mu_{G_B}(T)$$

$$= (1+K)\mu_{G_B}(0) - bT - \mu_{G_B}(T) = K \cdot \mu_{G_B}(T) - bT$$

因此

$$K = \frac{u_0(R)\sigma(T) + bT}{\mu_{G_B}(T)}$$

经计算, 得到不同可靠性 $R(T)$ 要求下, $u_0(R)$ 及余度系数 K 的关系, 如表 2 所示。

表 2 $R(T)$ 与 $u_0(R)$ 及 K 的关系

$R(T)$	0.9	0.95	0.99	0.999	0.9999	0.99999
$u_0(R)$	1.28	1.65	2.33	3.09	3.72	4.26
K	$\frac{1.28\sigma(T) + bT}{\mu_{G_B}(T)}$	$\frac{1.65\sigma(T) + bT}{\mu_{G_B}(T)}$	$\frac{2.33\sigma(T) + bT}{\mu_{G_B}(T)}$	$\frac{3.09\sigma(T) + bT}{\mu_{G_B}(T)}$	$\frac{3.72\sigma(T) + bT}{\mu_{G_B}(T)}$	$\frac{4.26\sigma(T) + bT}{\mu_{G_B}(T)}$

3 结论

(1) 传统的、基于经验的余度系数法, 可以保证设备满足系统的要求, 但是余度系数的确定不能仅凭经验, 应根据本文所提出的方法, 综合考虑设备性能的偏差、退化的速率、系统要求的偏差等, 便能获得更加科学的结果。

(2) 在初始时刻, 影响设备性能可靠性的因素是额定性能的离散性。对于短时间使用或性能退化速率非常缓慢的设备, 为了减小余度系数并保证性能可靠性, 必须提高生产的稳定性, 减小性能方差。

(3) 设备性能退化速度 b 对性能可靠性和余度系数有较大影响, 而使用、维护与保养对设备性能的退化速率影响很大, 为保持较高的性能可靠性, 必须加强维护保养的科学管理。

(4) 为简化问题, 文中假定设备的性能按线性退化、且退化速度恒定, 各类方差随时间的变化也未

在结果中体现。实际上, 利用实际数据、质量管理信息等可以得到这些数据和函数。对于锅炉给水量(即系统的需求)的离散性, 可以在设备性能方差的基础上, 利用热力计算模型, 综合处理各设备的耗汽量方差, 可通过进一步研究解决。

参考文献:

[1] 罗云. 舰用汽力装置原理与设计[D]. 武汉: 海军工程学院, 1983.
 [2] 金家善. 舰用汽力装置原理与战斗使用[D]. 武汉: 海军工程学院, 1996.
 [3] 何国伟. 可靠性工程概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.
 [4] 张俊华. 结构可靠性设计与分析[M]. 北京: 宇航出版社, 1989.
 [5] 曾天祥, 丁连芬, 译. 可靠性设计手册[M]. (第一卷), 北京: 航空工业出版社, 1987.
 [6] 罗云, 金家善, 郁军, 等. 设备可靠性管理——方法及程序[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1993

(何静芳 编辑)

duct has been fitted with flow-guide blades. Owing to the low intensity of the secondary flow and its small change along the ducts the flow condition has been improved. **Key words:** turbulent flow, large eddy simulation, flow field, finite element method, curved duct flow, flow-guide blade

确定船用蒸汽动力装置辅机余度系数的新方法 = **A New Method for Determining the Redundancy Factor of Auxiliary Machines for a Marine Steam Power Plant** [刊, 汉] / SHU Li-wei, JIN Jia-shan (Naval Engineering University, Wuhan, China, Post Code: 430033), JI Guang (Military Representative Office Stationed at Harbin Steam Turbine Works, Harbin, China, Post Code: 150046) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 514 ~ 516

With a turbine-driven feedwater pump serving as an example discussed is a method for determining the rated performance-based redundancy factor of auxiliaries for a marine steam power plant. The method under discussion takes into account in a comprehensive way several factors. They include: the discrete character of equipment rated performance during its manufacture, the degeneration mechanism of the rated performance with the passage of usage time, the discrete character as demanded of the equipment, etc. With performance-reliability serving as an objective the redundancy factor can be determined in a more rational way. This may provide guidance for the design of the thermodynamic system of a marine steam power plant as well as the type selection of other similar equipment items. **Key words:** performance reliability, degeneration, redundancy factor, marine steam power plant, turbine-driven feedwater pump

自动可调浓淡燃烧器低负荷稳燃特性 = **Low-load Stable Combustion Characteristics of an Automatic-adjustable Bias-combustion Pulverized-coal Burner** [刊, 汉] / LI Yong-hua, CHEN Hong-wei (North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003), LIANG Hua-zhong, et al (Shandong Luneng Development Company, Jinan, China, Post Code: 250000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 517 ~ 520

A new type of automatic-adjustable bias-combustion pulverized-coal burner is presented along with its service conditions in a power plant. The results of its operation has shown that the burner features an ability to regulate the distribution of air and pulverized coal during boiler operation, thus achieving the aim of operating at a drastically reduced load. **Key words:** burner, boiler, load

300 MW 机组 UP 型直流锅炉变压运行探讨 = **An Exploratory Study of the Variable-pressure Operation of an UP-type Once-through Boiler for a 300MW Unit** [刊, 汉] / KUANG Jiang-hong (College of Mechanical Engineering under the Shanghai University of Engineering & Technology, Shanghai, China, Post Code: 200336) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 521 ~ 523

Through a thermal calculation and analysis investigated are the operating characteristics of a UP-type once-through boiler and its feedwater pumps during its variable-pressure and peak-shaving operation. The authors concluded that a Chinese-made 300MW unit employing UP type once-through boilers basically possesses the ability to conduct a variable-pressure and peak-shaving operation. **Key words:** peak shaving, variable-pressure operation

TCDF-33.5 型 300 MW 汽轮机首次大修中的故障处理 = **Fault Treatment during the First-time Overhaul of a Model TCDF-33.5 300 MW Steam Turbine** [刊, 汉] / ZHANG Cai-wen, HUANG Hai-zhou, WANG Shu-shen (Hubei Provincial Electric Power Testing Research Institute, Wuhan, China, Post Code: 430077) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 524 ~ 526

Described are the following main faults detected during the first-time overhaul of a model TCDF-33.5 300MW steam tur-