

主机选型的多目标优化设计

吕青

(武汉船舶职业技术学院, 湖北 武汉 430050)

提 要 本文根据计算机辅助主推进装置设计的建模理论, 以系统、相关的观点为基础, 通过建立主机选型非线性多目标优化模型, 阐述了多目标优化的方法。

主题词 船舶推进 船用发动机 多目标分析 最优设计

当前, 国际上柴油机市场竞争激烈, 厂家争相降低柴油机的耗油率, 并且采用减额输出的方法, 以增加同一型号柴油机的功率覆盖面。这一方面给设计者带来了更大选择自由度, 另一方面, 也会使设计者忽视主机的某些工作点, 导致机船匹配不能达到最佳。本文介绍的多目标法, 就是一种解决在固定航速条件下, 在众多主机中选定较合适的主机及其设计工作点的优化设计方法。

1 目标的确定

从影响主机选型的因素, 如主机热效率 η_e 、初投资费用、重量、尺寸、可靠性、振动噪声等诸多方面来综合考虑选择主机。

1.1 推进总效率目标 η

$$\eta = \eta_e \cdot \eta_c \cdot \eta_k \cdot \eta_t \cdot \eta_n \cdot \eta_{op}$$

$$\eta_e = \frac{A N_e}{H_u g_e N_e} = \frac{A}{H_u g_e};$$

$$P = \left(\frac{n}{n_0}\right)^{\alpha} P_0, \quad n \geq n_0,$$

式中 A ——热功当量;

H_u —— 燃油的低发热值;

g_e —— 耗油率;

η_{op} —— 螺旋桨敞水效率;

N_e 、 η_e —— 柴油机的有效功率和有效效率;

P_0 、 n_0 —— 对于给定航速和阻力的船, 最小推进功率和相应转速;

P 、 n —— 满足航速要求的功率和转速。

假定轴系效率 η_c , 齿轮箱效率 η_k , 螺旋桨相对旋转变效率 η_t , 船身效率 η_n , 均为常数, 则:

$$\eta = C \cdot \frac{\eta_{op}}{g_e},$$

式中 $C = \frac{A \eta_e \cdot \eta_c \cdot \eta_k \cdot \eta_t \cdot \eta_n}{H_u}$ 。

当主机以 P_0 、 n_0 工作时, 螺旋桨敞水效率 $\eta_{op} = \eta_{opmax}$; 当主机以 P 、 n 工作时, 螺旋桨的效率下降 $\Delta\eta_{op}$, 即

$$\Delta\eta_{op} = \frac{P - P_0}{P_0} = \left(\frac{n}{n_0}\right)^{\alpha} - 1。$$

等航速线上任一点的螺旋桨敞水效率为:

$$\eta_{op} = \eta_{opmax} - \Delta\eta_{op} = \eta_{opmax} + 1 - \left(\frac{n}{n_0}\right)^{\alpha},$$

其中 $\alpha = 0.2 \sim 0.3$, 具体取值依船型而定。

设 g_{eo} 为某一特定柴油机的标称耗油率, 当实际选定的柴油机输出扭矩小于它的标称扭矩, 那么经过喷油定时调节和其他技术措施, 实际耗油率比标称值下降 Δg_e 。按文献分别用三次正交多项式拟合了 RTA 和 MC 系列柴油机的等油耗线, 对 MC 系列的柴油机, 其表达式为:

$$\Delta g_e = f\left(\frac{M}{M_m}\right) = \sum_{i=0}^3 A_i \left(\frac{M}{M_m}\right)^i,$$

其中 M —— 主机输出点的扭矩;

M_m —— 主机标称扭矩。

RAT 系列机的 Δg_e 对于给定的 n , $\Delta g_e = f(P, n)$, 当输出点的转速 n 位于两个固定转速之间时, 用线性插值的方法求得 Δg_e 。等航速线上任一点的主机耗油率

$$g_e = g_{eo} - \Delta g_e = g_{eo} - f\left(\frac{M}{M_m}\right);$$

或 $g_e = g_{eo} - f(P, n)。$

因此
$$\eta = C \frac{\eta_{opmax} + 1 - \left(\frac{n}{n_0}\right)^{\alpha}}{g_{eo} - f\left(\frac{M}{M_m}\right)}。$$

由于极大化 η/C 与极大化 η 是等价的, 为了方便, 下面用 η 表示 η/C 。

1.2 反映初始投资相对大小的目标 ΔP

一般情况下,所选主机的标称功率 MCR 不会正好等于所需的推进功率 P_0 ,而且为了获得较大的推进总效率要求主机的转速 n 与 n_0 尽可能地接近和具有较低的主机标称耗油率 g_{eo} 。然而,能满足这种要求的机都是具有很大的缸径和标称功率 MCR,通常 MCR 越大意味着初投资越大。我们可以用整机价格表示各个方案的绝对初投资大小,这样势必涉及到单位千瓦的市场价格。随着市场供应关系的变化,这些价格一直在波动。为了能够客观地反映初投资额度,采用主机标称功率 MCR 与涉及需要的推进功率 P_0 之差值 ΔP 作为一个目标是合理的。一方面该指标能够反映初投资的相对大小,另一方面,它与市场价格波动关系不大。显而易见,为了节省初投资应该设法使 ΔP 极小化,即

$$\min_i \Delta P_i = (MCR_i - P_0),$$

式中 Ω ——可行机型集合。

1.3 反映主机重量的目标 W

一般说,主机缸径越大,它的干重 G 就越大;而缸径越大,标称耗油率 g_{eo} 越小。如果仅仅以主机的干重 G 作为目标,显然是不合理的,因为这将导致选择小缸径柴油机。事实上,尽管大缸径机或 MCE 机的重量较大,但它们的标称耗油率 g_{eo} 低,因此,可以从减少燃油装载量得到一定的补偿。然而又不能把这两种重量等量齐观,因为主机重量是一个不变的常量,而燃油装载重量是航行时间 t 的函数。在此,本文用“权”表征它们之间的差别,至于如何规定权系数还有待于进一步探讨。为了全面地反映主机干重 G_i 和燃油装载重量的综合因素,本文以 W 作为反映重量的目标:

$$W = \omega G_i + \omega C_1 [G_{eo} - f(\frac{M}{M_m})] (\frac{n}{n_0})^\alpha P_0$$

其中 ω, ω ——权系数,

$$\omega + \omega = 0, \omega + \omega = 1;$$

C_1 ——与续航时间 t 及单位换算有关的系数。

2 主机选型的非线性多目标优化模型

为了统一起见,三个分目标均考虑极小化。关于推进总效率的目标改成:

$$\min \eta = 1 - \eta$$

记设计变量为:

$$\begin{aligned} (\frac{n}{n_0}, g_{eo}, G, MCR, H, L)^T &= (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)^T \\ (\eta, W, \Delta P)^T &= (Y_1, Y_2, Y_3)^T \\ &= (f(x_1), f(x_2), f(x_3))^T \end{aligned}$$

主机选型的多目标优化模型可表示为:

$$v - \min_y = (y_1, y_2, y_3)$$

$$g^1 = x_1 - 1.0 \quad 0$$

$$g^2 = n_{\max} - n_0 x_1 \quad 0$$

$$g^3 = n_{\min} - n_0 x_1 \quad 0$$

$$g^4 = M_m - x_1^{a-1} M_0 \quad 0$$

$$g^5 = x_1^{a-1} M_0 - M_{\min} \quad 0$$

$$g^6 = x_2 - g_{e\min} \quad 0$$

$$g^7 = g_{e\max} - x_2 \quad 0$$

$$g^8 = x_3 - G_{\min} \quad 0$$

$$g^9 = G_{\max} - x_3 \quad 0$$

$$g^{10} = D_{pm} + P_0 - x_4 \quad 0$$

$$g^{11} = H_{\max} - x_5 \quad 0$$

$$g^{12} = L_{\max} - x_6 \quad 0$$

或者 $V - \min_x = \{y_1(x), y_2(x), y_3(x)\}$

$$X = \{x \mid x \in R^6, g_i = 0, i = 1, 2, \dots, 12\} \quad (1)$$

式中 n_{\max}, M_{\min} ——柴油机 Layout 图规定的最大转速和最小扭矩;

n_{\min} ——最大允许的螺旋桨转速;

M_0 ——对应于 P_0, n_0 时的扭矩;

D_{pm} ——最大允许的功率差值。

式中其余下标 \max 和 \min 均表示设定的值。

(1) 式表明多目标优化是在空间 X 上进行的,可以按等价类关系划分 X 。设 X_i 是第 i 台机满足等航速要求的各点组成的集合, $E(X_i, Y)$ 是 X_i 上的有效解集,那么

$$X = \bigcup_{i=1}^n X_i$$

又定义 $X_i = E(X_i, Y)$

$$X = \bigcup_{i=1}^n X_i$$

或者 $X = \bigcup_{i=1}^n E(X_i, Y)$

显然(1)式的有效解集 $E(X, Y)$ 和极小向量集 Y 满足如下关系:

$$\begin{aligned} E(x, y) &\subset X \\ y &\subset Y \end{aligned}$$

其中 $X \xrightarrow{y} Y$

$$E(x, y) \xrightarrow{y} Y$$

3 优化求解

$\rho_s = 0.05115 \text{kg/m}^3。$

在状态 2 时 ($t_2 = 40$)湿空气中水蒸汽的质量流量为:

$$Q_{m2} = Q_2 \times \rho_s = 0.921 \times 0.05115$$
$$= 0.0471 (\text{kg/m}^3)。$$

(3) 析水量。

$$\Delta Q = Q_{m1} - Q_{m2}$$
$$= 0.4347 - 0.0471$$
$$= 0.3875 (\text{kg/min})$$
$$= 23.25 (\text{kg/h})。$$

液气分离器的除水率一般在 75% ~ 90% 之间,所以液气分离器的最终除水为:

$$m_w = \Delta Q \times (75\% + 90\%) / 2 = 19.18 \text{kg/h}。$$

5 阻力损失

按《容积式压缩机》规定,液气分离器在压缩机的主气体管路中应看成局部阻力损失,计算式为:

$$\Delta P_m = \zeta \times \frac{V_v^{-2}}{2} \times \rho (\text{N/m}^2),$$

式中 ζ ——局部阻力系数,取 5.0~8.0;
 V_v^{-2} ——气体在设备中的平均流速, m/s ;
 ρ ——工作压力下的气体密度, $\text{kg/m}^3。$

6 安装示意图

安装示意图见图 2。

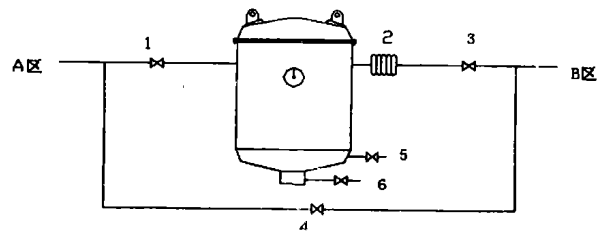


图 2 安装示意图

1,3—检修截止阀;2—膨胀结;
4—旁通阀;5—上排水阀;6—下排污阀

[下转第 37 页]

[上接第 10 页]

优化求解的目的是求出(1)式问题的有效解集 $E(X, Y)$ 。由于设计变量中有些是连续的,有些是整形量,因此增加了问题求解的复杂性。一般采用逐步逼近方法求解,即先在 X_i 上求出 $E(X_i, Y)$,然后在缩小的空间 X 上求出 $E(X, Y)$ 。

设 $y_{ij}^* = \min y_{ij} (i = 1 \sim 3)$ 分别是三个极小化的分目标值,它们对应的目标向量是:

$$y^{(1)} = (y_{11}, y_{12}, y_{13})^T;$$
$$y^{(2)} = (y_{21}, y_{22}, y_{23})^T;$$
$$y^{(3)} = (y_{31}, y_{32}, y_{33})^T。$$

令:

$$Y^{(i)}(y^{(i)}) = \{y \in Y, y \in y^{(i)}\}, (i = 1 \sim 3)$$
$$Y_1 = \bigcap_{i=1}^3 Y^{(i)}(y^{(i)}), (i = 1 \sim 3)$$
$$C = (C_1, C_2, C_3)$$

按照接触点定理可知,对 $\forall y \in Y$, 如果 $y \in (Y - Y_1)$,那么 $x \notin E(x, y)$,或者说如果 $Y < C$ 不成立,那么 $y \notin Y$ 。其逆未必这样,即对 $\forall y \in Y$, 如果还满足 $y \in (Y - Y_1)$,那么 X 是否属于 $E(X, Y)$ 有待进一步判别。经过这样识别后,在 X 中去掉了一部分非有效解,同时获得了三个有效解和三个弱极小向量,分别将它们归入 $E_w(X, Y)$ 和 Y_w ,然后在剩下的集合 $(Y - Y_1)$ 上重复上述过程。筛选法的计算步骤如下:

- 向量 $y^{(1)}, y^{(2)}, y^{(3)}$;
- (2) 求 $y^{(1)}, y^{(2)}, y^{(3)}$ 三个最大分目标组成 C 向量;
- (3) 把 $y^{(1)}, y^{(2)}, y^{(3)}$ 从 Y 去掉并归入 Y_w , Y 变成 Y ;
- (4) Y 中所有元素与 C 比较,如果 $Y < C$ 不成立,从 Y 中去掉该向量,直至比较完毕,得剩余集合 Y ;
- (5) 如果 $Y = 0$,则重复上述过程,反之转(6);
- (6) 在 Y_w 中去掉弱极小向量得 Y ,过程结束。

4 结论

如此通过对影响主机选型的主要因素的目标函数的确定,建立非线性多目标优化的数学模型,采用逐步逼近的筛选法进行优化计算,可较好地解决在主机选型设计中兼顾机船匹配和主机效率及经济性最佳的难题。

5 参考文献

1 高鹗,任文江.船舶动力装置设计.上海:上海交通大学出版社,1991.

2 崔朗然.船舶动力装置设计的经济分析.船舶工程,1995,(4):

3 商圣义.民用船舶动力装置.北京:人民交通出版社,1996.