

船用原动机调速系统的结构分析

李 风 (大连海运学院)

〔提要〕 本文对船用原动机调速系统进行了理论分析, 给出六种系统的稳态误差, 以便轮机员与电气员参考。

主题词 船用发动机 调速系统 分析

一、前 言

船用原动机多采用美国 Woodward 公司制造的调速器来进行调速与控制。该公司的产品有 UG、PG、SG 和 EG 型等。UG 型是最典型的调速器, 若从原理上掌握了其性能, 则对其它型的调速器自然会举一反三, 触类旁通。

本文将根据自动控制理论的观点, 对用 UG 型调速器与船用原动机相匹配而组成的六种运行方式的调速系统进行调速性能分析。给出不同系统的稳态误差, 以供有关人员参考。

二、船用原动机调速系统的职能框图及数学模型

船用原动机调速系统的职能框图如图 1 所示, 其中包含两个局部反馈, 即刚性反馈和弹性反馈(阻尼器)。图 1 中的 φ_0 是转速给定信号, φ 是输出转速, λ 为外界干扰信号(负荷), η 为油动机的输出信号, σ 为弹性反馈信号, $\theta_0 \eta$ 为刚性反馈信号, ξ 为调速器的输出信号, e 为误差信号。

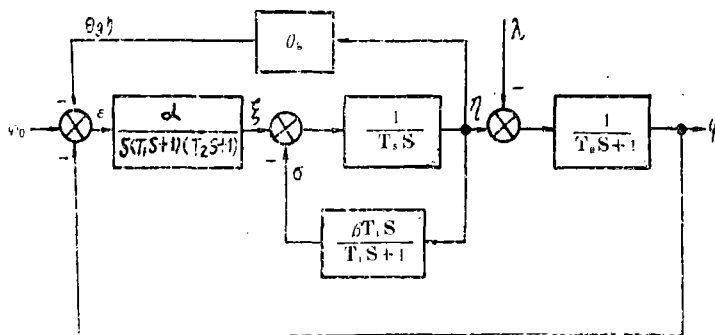


图 1 船用原动机调速系统的职能框图

与图 1 对应的原动机调速系统的线性数学模型框图如图 2 所示。其中: β 为阻尼系数, T_1 与 T_2 为两个惯性环节相串联的调速器时间常数, T_3 为阻尼器的时间常数, T_4 为油动机的时间常数, T_5 为原动机的时间常数。 α 为系数。 δ 为离心飞块机构的不均匀系数。

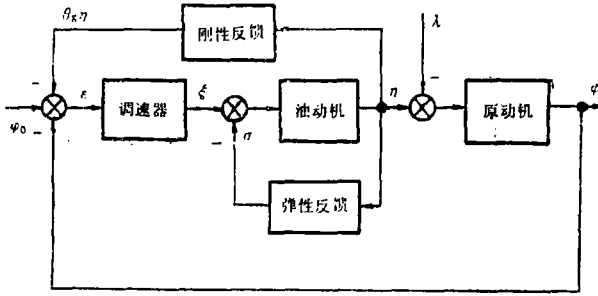


图 2 原动机调速系统线性数学模型框图

将图 2 按结构图的简化原则进行简化后, 则可得到无内环的框图 3, 其中 $K_K = \alpha \cdot (\beta \delta T_i)^{-1}$, $T_S \cdot (\beta T_i)^{-1} \ll 1$ 忽略不计。

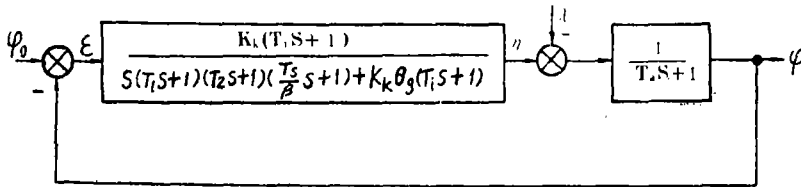


图 3 原动机调速系统的简化框图

根据图 3 可求取系统的开环传递函数为:

$$G_K(S) = K_K(T_i S + 1) \cdot \{ [S(T_1 S + 1)(T_2 S + 1) \left(\frac{T_S}{\beta} S + 1\right) + K_K \theta_g(T_i S + 1)] (T_o S + 1) \}^{-1} \quad (1)$$

对于转数给定量作为输入信号时, 系统的闭环传递函数为:

$$G_{\varphi B}(S) = \frac{G_K(S)}{1 + G_K(S)} = \frac{K_K(T_i S + 1)}{[S(T_1 S + 1)(T_2 S + 1) \left(\frac{T_S}{\beta} S + 1\right) + K_K \theta_g(T_i S + 1)]} \cdot \frac{1}{(T_o S + 1) + K_K(T_i S + 1)} \quad (2)$$

对于负荷干扰作为输入信号时, 系统的闭环传递函数为:

$$G_{\lambda B}(S) = -\frac{G_o(S)}{1 + G_K(S)} = -\frac{-[S(T_1 S + 1)(T_2 S + 1) \left(\frac{T_S}{\beta} S + 1\right) + K_K \theta_g(T_i S + 1)]}{[S(T_1 S + 1)(T_2 S + 1) \left(\frac{T_S}{\beta} S + 1\right) + K_K \theta_g(T_i S + 1)]} \cdot \frac{1}{(T_o S + 1) + K_K(T_i S + 1)} \quad (3)$$

系统输入输出关系的传递函数表达式为:

$$\varphi(S) = G_{\varphi B}(S)\varphi_0(S) + G_{\lambda B}(S)\lambda(S) \quad (4)$$

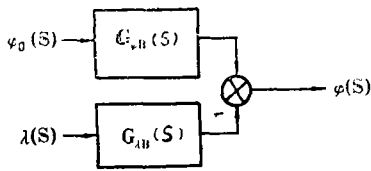


图 4 系统的输入输出传递函数框图

上式所对应的输入输出的传递函数框图如图 4:

由图 4 显然可知: 输出信号 $\varphi(S)$ 不取决于系统的输入信号 $\varphi_0(S)$ (转速给定值), 而且还取决于原动机的负荷 (干扰) 信号 $\lambda(S)$ 。

三、系统的结构分析

根据原动机调速系统线性数学模型框图 (图 2), 可以组成各种结构形式的系统:

1. 软、硬反馈都存在;
2. 切除硬反馈, 保留软反馈;
3. 切除软反馈, 保留硬反馈;
4. 软反馈改成硬反馈, 保留硬反馈;
5. 软反馈改成硬反馈, 切除硬反馈;
6. 软、硬反馈均切除。

现将上述六种结构形式的系统进行对输入信号和干扰信号的系统稳态误差分析。

1. 软、硬反馈都具全的系统稳态误差

这是 UG 型调速器的原型结构, 也是船舶电站原动机调速系统通常采用的结构形式。

根据图 3 可求出系统的误差传递函数为:

$$\begin{aligned}
 E(S) &= \frac{1}{G_K(S)+1} \varphi_0(S) + \frac{G_a(S)}{G_K(S)+1} \lambda(S) \\
 &= \frac{\left[S(T_1S+1)(T_2S+1) \left(\frac{T_S}{\beta} S+1 \right) + K_K \theta_a (T_iS+1) \right] (T_aS+1)}{\left[S(T_1S+1)(T_2S+1) \left(\frac{T_S}{\beta} S+1 \right) + K_K \theta_a (T_iS+1) \right] (T_aS+1) + K_K (T_iS+1)} \varphi_0(S) \\
 &\quad + \frac{S(T_1S+1)(T_2S+1) \left(\frac{T_S}{\beta} S+1 \right) + K_K \theta_a (T_iS+1)}{\left[S(T_1S+1)(T_2S+1) \left(\frac{T_S}{\beta} S+1 \right) + K_K \theta_a (T_iS+1) \right] (T_aS+1) + K_K (T_iS+1)} \lambda(S)
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

对控制信号的系统稳态误差仅与上式的第一项有关。考虑到船舶电站的实际操作, 是在配电盘上遥控原动机, 通过原动机调速电机 (同步器电动机) 来实现转速给定, 如果同步器电动机的转速保持不变, 则转速给定值是斜坡函数:

$$\begin{aligned}
 \varphi(t) &= \varphi_0 + Vt \quad (0 \leq t \leq T) \\
 \varphi(t) - \varphi_0 &= \Delta\varphi(t) = Vt
 \end{aligned}$$

或者写成拉氏变换式形式:

$$\Delta\varphi(S) = V/S^2$$

其中: V —调速电动机的给定速度, $\Delta\varphi$ 为给定转速的变化值, t 为时间, T 为终止时间。

于是

$$E_{\varphi}(S) = \frac{1}{G_K(S) + 1} \cdot \frac{U}{S^2}$$

取极限，得：

$$E_{\varphi}(t) \Big|_{t \rightarrow \infty} = \lim_{s \rightarrow 0} S E_{\varphi}(S) = \infty$$

由开环传递函数可知：在此情况下，系统为零型。因此，对于斜坡形式的转数给定值来说，系统无跟踪能力，其稳误差为无穷大。

如果当给定转数是阶跃函数，则 $\Delta\varphi(S) = \varphi_0/S$ ，在此情况下的系统稳态误差为：

$$E_{\varphi}(s) = [G_K(S) + 1]^{-1} \cdot \varphi_0/S$$

$$E_{\varphi}(t) \Big|_{t \rightarrow \infty} = \lim_{s \rightarrow 0} S E_{\varphi}(S) = \theta_g(1 + \theta_g)^{-1} \cdot \varphi_0$$

当 $\theta_g \ll 1$ ，则

$$E(\infty) = \theta_g \varphi_0$$

由此可见，当 φ_0 为定值时，系统的误差完全由硬反馈系数 θ_g 确定。

对干扰信号的系统误差仅与 (4) 式的第二项有关。船舶电站的负荷变动大多是起、停各种电气设备，因此，负荷是按阶跃函数形式变化的。换言之，即为下式：

$$\Delta\lambda(S) = \Delta\lambda/S$$

对干扰信号的系统稳态误差为：

$$E_{\lambda}(S) = \{G_a(S)/[G_K(S) + 1]\} \cdot (\Delta\lambda/S)$$

$$E_{\lambda}(t) \Big|_{t \rightarrow \infty} = \lim_{s \rightarrow 0} S E_{\lambda}(S) = [\theta_g \cdot (1 + \theta_g)^{-1}] \cdot \Delta\lambda$$

当 $\theta_g \ll 1$ 时，则

$$e_{\lambda}(\infty) = \theta_g \Delta\lambda$$

上式说明：对干扰信号的系统稳态误差为硬反馈系数与负荷的跃变量之乘积。

当突加突甩全负荷时， $\Delta\lambda = \pm 1$ ，这时的误差仅与 θ_g 有关。即硬反馈系数就是系统的稳态误差（静态不均匀度）。调整硬反馈系数的值，可以得到不同的不均匀度。

在实际系统中， θ_g 是可以调整的。由运行人员根据需要来选取 θ_g 的值。

2. 切除硬反馈、保留软反馈

系统的开环传递函数为：

$$G_K(S) = K_K(T_i S + 1) \cdot \left[S(T_1 S + 1)(T_2 S + 1) \left(\frac{T_f}{\beta} S + 1 \right) (T_0 S + 1) \right]^{-1} \quad (6)$$

对斜坡输入信号的系统稳态误差为：

$$E_{\varphi}(S) = [G_K(S) + 1]^{-1} \cdot V \cdot S^{-2}$$

$$E_{\varphi}(t) \Big|_{t \rightarrow \infty} = \lim_{s \rightarrow 0} S E_{\varphi}(S) = V/K_K$$

系统为 I 型系统，对斜坡形式的输入信号，系统有跟踪能力，稳态误差为 V/K_K 。

对阶跃输入信号系统的稳态误差为零：

$$E_{\varphi}(S) = [G_K(S) + 1]^{-1} \cdot V \cdot S^{-1}$$

$$E_{\varphi}(S) \Big|_{t \rightarrow \infty} = \lim_{s \rightarrow 0} S E_{\varphi}(S) = 0$$

对负荷变化时的系统稳态误差为:

$$E_{\lambda}(S) = G_o(S) [G_K(S) + 1]^{-1} \cdot \Delta\lambda \cdot S^{-1}$$

$$E_{\lambda}(t) \Big|_{t \rightarrow \infty} = \lim_{s \rightarrow 0} S E_{\lambda}(S) = 0$$

这时的系统是无差系统, 原动机的调速特性是一条平行于横轴的水平线。

3. 切除软反馈、保留硬反馈

系统的开环传递函数为:

$$G_K(S) = \alpha \{ [\delta T_s S (T_1 S + 1) (T_2 S + 1) + \alpha \theta_g] (T_o S + 1) \}^{-1} \quad (7)$$

系统为零型系统。对阶跃输入信号时的系统稳态误差为:

$$E_{\varphi}(S) = [G_K(S) + 1]^{-1} \cdot \Delta\varphi \cdot S^{-1}$$

$$E_{\varphi}(t) \Big|_{t \rightarrow \infty} = \lim_{s \rightarrow 0} S E_{\varphi}(S) = \theta_g \Delta\varphi \cdot (1 + \theta_g)^{-1}$$

因为 $\theta_g \ll 1$, 则

$$E_{\lambda}(\infty) = \theta_g \Delta\varphi$$

对负荷变动时的系统稳态误差为:

$$E_{\lambda}(S) = G_o(S) \cdot [G_K(S) + 1]^{-1} \cdot \Delta\lambda \cdot S^{-1}$$

$$E_{\lambda}(t) \Big|_{t \rightarrow \infty} = \lim_{s \rightarrow 0} S E_{\lambda}(S) = \theta_g \Delta\lambda \cdot (1 + \theta_g)^{-1} = \theta_g \Delta\lambda$$

显然, 系统仍为有差系统, 稳态误差由硬反馈系数与负荷变化值的乘积决定。

4. 软反馈改成硬反馈(硬反馈系数为 β), 保留硬反馈

系统的开环传递函数为:

$$G_K(S) = \alpha \cdot \{ \delta (T_1 S + 1) (T_2 S + 1) (T_s S + \beta) + \theta_g \alpha \} (T_o S + 1) \}^{-1} \quad (8)$$

系统为零型系统, 是有差系统, 其误差分别为:

$$E_{\varphi}(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} S E_{\varphi}(S) = (\delta\beta + \theta_g \alpha) \cdot (\delta\beta + \theta_g \alpha + \alpha)^{-1} \cdot \Delta\varphi$$

$$E_{\lambda}(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} S E_{\lambda}(S) = (\delta\beta + \theta_g \alpha) \cdot (\delta\beta + \theta_g \alpha + \alpha)^{-1} \cdot \Delta\lambda$$

5. 软反馈改成硬反馈, 切除硬反馈

系统的开环传递函数为:

$$G_K(S) = \alpha \cdot [\delta (T_1 S + 1) (T_2 S + 1) (T_s S + \beta) (T_o S + 1)]^{-1} \quad (9)$$

系统为零型系统, 是有差系统, 其误差分别为:

$$E_{\varphi}(\infty) = \delta\beta \cdot (\delta\beta + \alpha)^{-1} \cdot \Delta\varphi$$

$$E_{\lambda}(\infty) = \delta\beta \cdot (\delta\beta + \alpha)^{-1} \cdot \Delta\lambda$$

6. 软、硬反馈均切除

系统为 I 型系统, 是无差系统。

利用 Woodward 公司的专用算尺可算出超调量, 故不赘述。

四、结 论

从以上分析可得出结论: UG 型调速器可根据不同控制对象的技术要求, 采用不同的反

馈方式,可以得到所需要的有差与无差调速系统,UG型调速器是适应性较广的调速器,利用这种调节器与原动机相匹配,可获得各种调速方式,所以我们称它是万能调速器。本文的分析原则同样适用于其它类型调速器所组成的闭环调速系统。

参 考 文 献

- [1] 李 风:船舶自动控制系统,大连海运学院讲义,1981.5
 [2] 李友善:自动控制原理,国防工业出版社 1981.8

(孙显辉 编辑)

新 产 品 新 技 术 信 息

N6R88—35 LH—X全自动供水装置 是理想的供水设备。该产品通过了部、省联合鉴定,产品性能达到了国内先进水平,实现了无人管理、连续供水。该产品采用最佳控制,运行安全可靠;水质清洁卫生;噪音低于国家规定标准;旁通供水、运行稳定。该产品可代替高位水箱、水塔,为高层建筑、工矿企业、农村饮水、喷灌等场所的理想供水设备。可按用户要求设计和加工。

N6R88—36 彩色不锈钢 彩色不锈钢板及制品先后通过了技术鉴定会和两个部级产品鉴定会鉴定,其性能达到国外同类产品水平,某些指标已超过国外现有水平。彩色不锈钢色彩丰富,性能优越,具有无毒、耐高温耐腐蚀、可弯曲、可拉伸、可冲压等特点。可用于现代建筑,高级宾馆及商场的室内外装饰。还可以用于机械设备、高档商品及牌匾贴面装修等。本产品可根据用户的要求进行设计和加工。

N6R88—53 燃气轮机试验站 位于无锡市埭河乡勤新村支巷19号,占地23000m²,建筑面积10100m²。试验站设计先进,具有八十年代国际水平,配备先进的测试设备,可以进行最大功率达36.8MW(50000马力)的舰船及工业用燃气轮机的原理性样机科研调试生产型机组的小批量出厂试车以及陆上长期耐久性试验。欢迎客户使用该试验站。服务方式:承接试验。

N6R88—54 JC型磁化节油器 普遍适用于11000kW以下功率的船舶、车辆、铁线内燃机车及电站柴油机。节油率超过2%,可达5—10%;烟气质量及烟度的改善更为显著。性能优于国际、国内同类产品,已通过部级鉴定。服务方式:技术转让,提供产品。

N6R88—55 汽车轮胎装拆机 用于各种轿车和面包车等车型的无锁圈车轮的剥胎和装胎。使装剥轮胎半机械化,比手工拆装提高工效5—6倍。装剥钢圈直径250—400毫米,装剥轮胎时不损伤外胎唇和钢圈,不破坏车轮的动平衡性能。本机由电机驱动,电源电压380伏,功率0.75千瓦,自重190公斤。服务方式:技术转让(限江苏省以外),产品销售。

(如需以上技术或产品,请与编辑部联系)

JOURNAL OF ENGINEERING THERMAL ENERGY AND POWER

NO.2 1989

CONTENTS

Finite Time Thermodynamics Analysis and Evaluation for a Heat Engine with Steady-state Energy Conversion between Heat Sources

.....Sun Fengrui, Chen Lingen
Chen Wenzhen (1)

Abstract

Presented in this paper is an analysis of the finite time thermodynamics for a heat engine with steady-state energy conversion between heat sources. With respect to the actual process existing in a steam power plant, a finite time thermodynamics method taking account of both the output power and heat efficiency has been put forward to select and evaluate an actual power plant. The results obtained are found to be in good agreement with those of the thermotechnical parameter optimization method.

Key words: Finite time thermodynamics, Carnot cycle, Steam power plant, Optimized design.

Finite Time Thermodynamics for Heat Engines:

Theory and Applications.....Chen Lingen,
Sun Fengrui, Chen Wenzhen (7)

Abstract

This paper presents a review of the finite time thermodynamics for heat engines in respect of the following aspects: the study of Newton law system, an analysis of thermal resistance and other irreversible loss models effects as well as finite reservoirs and source-type reservoirs effects, and finally, the application of heat engine design and its evaluation.

Key words: modern thermodynamics, Carnot cycle, endoreversible cycle, heat engine, optimal design.

The Structural Analysis of a Speed Governing System for a Marine prime Mover.....Li Feng (15)

Abstract

This paper gives a theoretical analysis of the speed governing system for a

marine prime mover with the steady-state error constants of six systems being provided, which can serve as useful reference data to marine and electrical engineers.

Key words: marine engines, speed governing system, analysis.

MIA-01-CC Chen's Cycle Co-generation Power Plant..... Wen Xueyou (21)

A Study on the serious Corrosion Found on a Marine Main

Superheater.....Gong Sanxing (26)

Abstract

The chief causes of serious corrosion found in a marine main boiler superheater are analysed. It has been pointed out that the boiler operation in conformity with the thermal calculations drawn up by the boiler design bureau is justified and is to be recommended.

Key words: corrosion of marine boiler superheater, steam wetness

The Present Status of Industrial and Marine Boiler Development in

Foreign Countries.....Cnen Qiduo, Sun Shaojing,

Lin Binggang, li weigen (31)

Abstract

This paper gives a brief description of the industrial and marine boiler development in some foreign countries. Presented in some detail are the technical achievements as regards the enhancement of boiler capacity and steam parameters, improvement of boiler design and efficiency, upgrading of firing equipment and the use of advanced automatic control systems, etc.

Key words: industrial boilers, marine boilers.

Aerodynamic Design of a Low pressure Compressor

.....Ju shili, Li Fei, Zhao Yousheng (38)

Abstract

By adopting a test-based two-dimensional method coupled with three-dimensional verification calculations a high-quality lowpressure compressor with characteristics capable of satisfying preset technical requirements has been successfully designed. The test results of the compressor as a whole have shown that the compressor without any further adjustment can attain all design objectives in respect of flow rate, pressure ratio and efficiency. With operating points being optimized it is possible to achieve an even better performance. The compressor features good working characteristics when operating at low load conditions, a relatively wide range of stable operation and an uniform outlet flow field.

Key words: low pressure compressor, aerodynamic design.

Boundary Element Method for the Solution of Subsonic Compressible

Plane Cascade Flow Fields by Use of Equivalent Cascades

..... Lin Chengxian, Liao Aixian (44)