

关于汽轮机某一数字测速方法的动态分析及其改进

于达仁(哈尔滨工业大学)

〔提要〕本文对汽轮机一种数字测速方法的动态特性进行了分析,发现其相位滞后太大,不能用于闭环转速控制系统。本文作者对其进行了改进,在工作频带内得到了接近于零的相位滞后,完全可用于闭环控制。

主题词 汽轮机 动态特性 转速测量 数字测量 数学模型 方法 改进

一、数字测速原理及其数学模型



图1 测速原理

如图1所示,转子每转一周,能发出P个脉冲,在 $(\tau - T, \tau)$ 内数到几个脉冲,则得到转速在 τ 时刻的测量值:

$$f^*(\tau) = n / (P \cdot T) \quad (1)$$

实质上,脉冲个数的物理意义是转子的角位移,设在 $(\tau - T, \tau)$ 内转子的角位移为 θ ,则:

$$\theta = 2n\pi / p = \int_{\tau-T}^{\tau} f(t) dt \quad (2)$$

综合式(1)得:

$$f^*(\tau) = \frac{1}{T} \int_{\tau-T}^{\tau} f(t) dt \quad (3)$$

这就是上述测速方法的数学描述。为了便于分析,对式(3)进行 Laplace 变换,可得到频域模型:

$$\begin{aligned} f^*(s) &= (1 - e^{-Ts}) / TS \cdot f(s) \\ &= W(s) \cdot f(s) \quad (4) \end{aligned}$$

$W(s)$ 的频率特性为:

$$\begin{aligned} W(\omega j) &= \left| S_m \left(\frac{\omega T}{2} \right) / \left(\frac{\omega T}{2} \right) \right| \\ &\times e^{-\frac{T\omega}{2} j} \\ &= K(\omega) e^{-0.5T\omega j} \end{aligned}$$

可见, $W(\omega_i)$ 可分成两部分, 一部分是一个纯滞后环节 $e^{-0.5T_s}$, 另一部分是一个与频率有关的放大倍数 $K(\omega)$ (见图2)。 $K(\omega)$ 的低通特性对消除高频的随机干扰是很有利的。

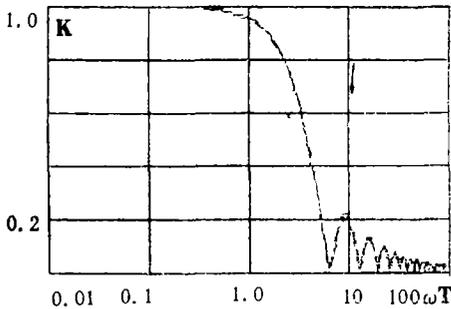


图2 $K(\omega)$ 特性

这种方法具有纯滞后特性, 这是其主要缺点, 限制了此测速方法在闭环系统中的应用。我们知道, 若在闭环的反馈回路中串入一个纯滞后环节, 必然使系统的稳定性和鲁棒性降低; 为减小其不良影响, 一个直观方法是减小测量周期 T , 但受到计算机运算速度和静态测量精度的限制, T 又不能太小^[1]。为解决这个矛盾, 本文推导了两个运算简单的数据校正公式, 测量数据经校正后有效地克服了相位滞后, 完全可满足闭环控制的要求。

二、数据校正公式的推导

1. 反滤波方法的局限性

从式(4)可知, 测量值与真实值间的差别就在于乘了一个传递函数 $W(s)$; 在信号理论中, 称这种误差为卷积型干扰, 通用的克服办法是反滤波。由式(4)可得到:

$$y(s) = f(s) = f^*(s) \cdot W^{-1}(s) \quad (5)$$

其中, $W^{-1}(s)$ 称为反滤波器。理论上, 使用反滤波技术能不失真地恢复原信号, 但是在本文所述的情况下, $W^{-1}(s)$ 的实现存在技

术上的障碍。由式(5)进行逆Laplace变换能得到:

$$y(t) - y(t-T) = T \cdot \frac{d}{dt} f^*(t)$$

且不说在数字算法中如何准确地实现微分, 仅上面的差分方程本身就不是稳定的, 无法应用。

另一种方法是直接对式(5)进行离散化得到数字算式, 据文献[2], 双线性变换是最好的离散化方法, 用此方法离散化得:

$$y(z) = f^*(z) \frac{2}{1+z^{-1}}$$

得到的离散化传递函数必然有一个 $z = -1$ 极点, 临界稳定, 也无法应用。

所以, 用反滤波方法来恢复信号在这里是不适合的。下面介绍本文导出的算法。

2. 校正算法的推导

由图2可知, 在 $\omega T \in [0, 1]$ 时, $K(\omega)$ 几乎为1; 汽轮机测速系统的工作频带实际上比这个范围还要窄些 (一般取采样频率为信号频率的10倍, 有 $\omega T \in [0, 0.628]$), 所以, 可以认为在有用范围内 $K(\omega) = 1$; 故有:

$$f^*(s) = f(s) \cdot e^{-0.5T_s} \quad (6)$$

这说明测量值比真实值落后 $0.5T$ 时间。由式(6)得:

$$f(s) = f^*(s) \cdot e^{0.5T_s} \quad (7)$$

环节 $e^{0.5T_s}$ 称为预测环节, 物理上是无法实现的。但它启发我们, 能否用已测得的 $\{f^*(t_k), K=0, 1, 2, \dots, N\}$ 序列来预估 $f^*(t_k + 0.5T)$ 呢? 若能够实现, 式(7)保证了 $f^*(t_k + 0.5T)$ 将是 $f(t_k)$ 的很好的近似。答案是肯定的, 所用的工具就是数学上的外插法。

设已知数据列 $\{f^*(t_k), K=0, 1, \dots, N\}$ 希望用外插法得到 $f^*(t_N + 0.5T)$ 的预测值。我们选用低阶多项式作预测模型, 这样

做是基于下面的理由：(1) 用多项式作预测模型，得到的预测值表示为已知数据的线性组合，便于在线计算；(2) 一般的过程输出在短时间内都能与低阶多项式相吻合，可以容易地导出一阶和二阶的预测公式：

$$f_1(t) = 1.5f^*(t) - 0.5f^*(t - T) \quad (8)$$

$$f_2(t) = 1.875f^*(t) - 1.25f^*(t - T) + 0.375f^*(t - 2T) \quad (9)$$

下面在频域里分析一下上面校正公式的效果。对式(8)，(9)进行 Laplace 变换：

$$f_1(s) = (1.5 - 0.5e^{-TS})f^*(s) \quad (10)$$

$$f_2(s) = (1.875 - 1.25e^{-TS} + 0.375e^{-2TS}) \cdot f^*(s) \quad (11)$$

综合式(4)，可得到 $f_1(s)$ 和 $f_2(s)$ 对 $f(s)$ 的传递函数 $W_1(s)$ 和 $W_2(s)$ ：

$$W_1(s) = f_1(s)/f(s) = (3 - e^{-TS})(1 - e^{TS})/(2TS) \quad (12)$$

$$W_2(s) = f_2(s)/f(s) = (1.875 - 1.25e^{-TS} + 0.375e^{-2TS}) \times (1 - e^{-TS})/TS \quad (13)$$

图3是 $W(s)$, $W_1(s)$, $W_2(s)$ 的幅频和相频特性，可以看出，在工作频带内， $W_1(s)$, $W_2(s)$ 的相位滞后几乎完全得到补偿，效果是显著的。

我们在观察时域中的效果。设 $f(t) = S_m t$ ，在不同的采样周期 T 下得到两组曲线（如图4），其中实线为 $f(t)$ ；可见，即使在 $WT = 0.4$ 时， $f_2(t)$ 与 $f(t)$ 也能很好符合，而不经校正的数据 $f^*(t)$ 与 $f(t)$ 相差甚大。由以上的分析可见，本文的校正公式能显著提高测量精度。公式的计算量很小，便于计算机在线实现。

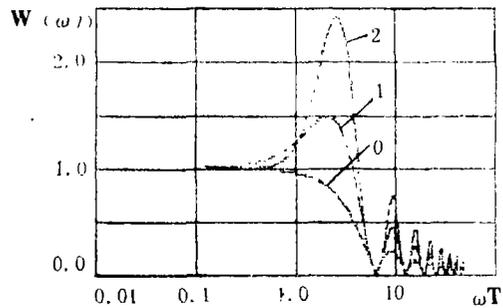
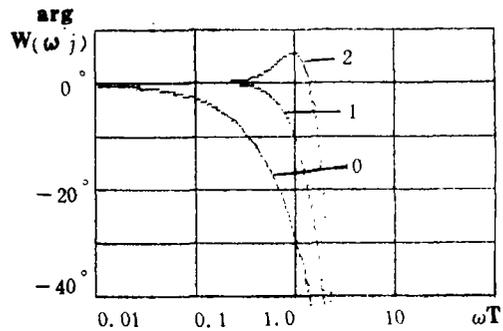


图3 频率特性 [(0-W(s), 1-W₁(s), 2-W₂(s))]

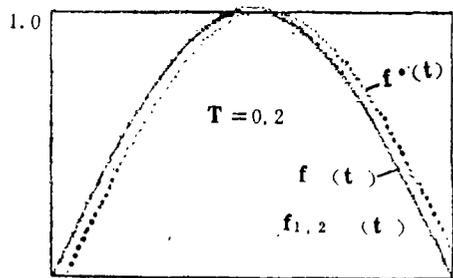
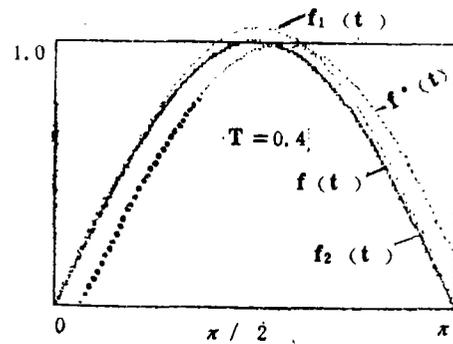


图4 $f(t) = S_m t$

三、硬件方面的改进

在上述测速方法中,为保证静态测量精度,在一个周期 T 中必须包含足够多的脉冲(因脉冲计数有 ± 1 个的误差)。对汽轮机来讲,测速齿轮一般是60齿,额定转速下发出的脉冲频率为3000Hz,为保证 3000 ± 1 转/分的测量精度需用 $T=1$ 秒的测量周期,对汽轮机的转速控制系统来说,这样的采样周期是太长了。在不降低静态精度的前提下,增加测速齿轮的齿数能使 T 减小,但这是有限的也是不经济的。实际上,对已有的脉冲信号进行倍频,就能起到增加齿数的效果。

普通的倍频电路很难做到非常稳定的均相倍频,不能满足精度要求。这里采用高质量的PLL(锁相环)倍频电路,对已有信号进行10倍频,然后测量,这时 T 可取0.1秒。对典型的汽轮机转速控制回路,频带约 $[0 \sim 3]$ rad/s, $W_c T = 3 \times 0.1 = 0.3$ 。由图4知,经校正后采样点上的值已能很好地逼近真实值;另外,采样频率已达信号频率的20倍,足可满足要求,

用锁相环倍频既经济,效果又好,值得在数字测速系统中推广。当然,锁相环倍频的倍率是有限的,倍率太高时,锁相环输出信号的相位抖动(噪声)变大,会反过来影响测量精度。图5是用NE565(集成锁相环)和SN7490(10分频器)构成的10倍频电路,供参考。

四、结 论

文献[1]所述测速方法相位滞后太大,不能用于闭环控制;采用本文建议的锁相倍频技术和数字校正方法后,动态性能大大改善,经验算完全能满足汽轮机闭环控制的要求,为汽轮机的计算机控制提供了一种有效的测速方法。本文的成果将用于正在研制的一套全数字汽轮机调速系统中。

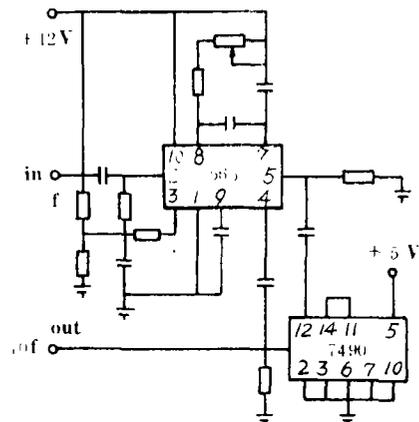


图5 PLL10倍频器

另外,本文建立的测速方法数学模型也可用于调速系统的动特性分析。

参 考 文 献

- [1] 叶道益. 微机数字转速测量在汽轮机中的应用. 汽轮机技术, 1988, (5)
- [2] Puat Katt. 微处理机数字控制. 宇航出版社, 1984
- [3] 田孝文. 锁相环原理、应用与计算机辅助分析. 成都电讯工程学院出版社, 1986

(下转第11页)

五、结 论

1. 通过试验给出以可变尾缘叶片作为压气机进口导叶的平面叶栅气动特性。这些特性明显地优于可转导叶, 变尾缘叶栅的最佳相对尾缘长度为 $(b_1/b)_{opt} = 0.75$, 最佳稠度为 $(b/t)_{opt} = 1.25$ 。当几何参数选取不当时, 气动特性较可转导叶差。

2. 本叶型的叶栅适宜在马赫数小于 0.6 的工况下工作, 尾缘转角 α 的有效变化区间为 50° , 可使轴向气流转折 60° 。

3. 气流转折角大于文献中三个叶节的变弯度叶栅的数据。并与卡特尔准则得到的数据趋势基本一致。

4. 本试验数据可直接应用于轴流压气机设计。以变尾缘导叶代替可转导叶作为压气机进口导叶是合理的。低压压气机试验证明本叶栅是扩大压气机稳定运行范围的有效方法之一。

闻雪友总工程师对本文给予很大帮助, 仅致谢意。

(上接第15页)

A Dynamic Characteristics Analysis and Improvement on a Digital Method for measuring Rotational Speed of Steam Turbines

Yu Daren

(Harbin Institute of Technology)

Abstract

A digital method for measuring the rotational speed of steam turbines is analysed and found inapplicable for a feedback control system because of the great amount of its phase delay. After an improvement described in this paper, it is now quite suitable to the said application with almost no phase delay within its working frequency band.

Key Words: *steam turbine, dynamic characteristics, rotational speed measurement, digital measurement, mathematic model, method, improvement*

参 考 文 献

- [1] Seroy G K, Kavanagh P. Considerations in the Design of Variable-Geometry Blading for Axial-Flow Compressor Stages. NATO Advisory Group for Aerospace Research and Development AGARD CP 1968, (34)
- [2] Jones B A, and others. Single Stage Experimental Evaluation of Variable Geometry Guide Vanes and Stators. NASA CR-54554. Aug. 1968
- [3] 同文献[2], NASA CR-54556, Dec. 1968
- [4] 同文献[2], NASA CR-54557, Dec. 1968
- [5] 同文献[2], NASA CR-54555, Dec. 1968
- [6] 同文献[2] NASA CR-54559, March 1970
- [7] Okishi T H, Junkhan G H, Seroy G K. Experimental performance in Annular Cascade of Variable Trailing Edge Flap, Axial flow Compressor inlet Guide Vanes. ASME Gas Turbine Conference and products show, 1970. Vol 2. 70-GT-106
- [8] Cartre A D S. The Low-Speed Performance of Related Airfoils in cascades. Great Britain ARC C.P. 1950(29)
- [9] 陈刚等. 大弯度扩压叶栅的试验研究. 叶轮机械气动热力计算、设计与试验经验交流会文集, 1977 (续完)