

封闭盘轴系统扭转振动固有频率的计算

苏文斗(黑龙江省能源研究所)

〔摘要〕 根据工程实际的需要,对封闭盘轴系统扭转振动固有频率的计算方法进行了探讨,并给出了计算程序。

关键词 涡轮 轮盘 轴系 扭转振动 频率计算

一、前言

蒸汽动力装置的扭转振动问题早已引起了人们的注意。船用透平齿轮机组由于扭振可能造成齿轮轮齿的损坏,而汽轮发电机组,电网与机组轴系的扭振现象也是发展大电网和大机组所必需注意的问题,国内外已发生多起由于网—机谐振而造成机组严重损坏的重大事故。仅1969—1988年,国内外因扭振引起的机组损坏事故多达30多起,包括50 MW以上火电机组及900 MW的核电机组。解决这个问题离不开调频。因此,准确地计算整个动力装置的各阶扭振固有频率是很重要的工作。

整个动力装置可以简化成盘轴扭振系统,如单支链式盘轴系统、具有一个或几个分支系统等。但工程上还会遇到封闭盘轴扭振系统的计算问题。船用透平齿轮机组的功率分支两级减速齿轮箱就是个封闭系统。但由于两个并联的分支往往具有相同或基本相同的结构参数,因此往往可以把它简化成单支系统进行计算。但是,象对这些齿轮箱进行试验的肯靠肯式试验台,则是由两个不同参数的分支并联而成的封闭系统。所以,研

究封闭盘轴扭振系统固有频率的计算方法是工程实践中提出的一个课题。

二、计算方法

文献〔1〕详细地介绍了用传递矩阵法求解链式单支或分支盘轴扭振系统固有频率的步骤,并给出了计算机计算程序。本文讨论了如何用传递矩阵法来解决封闭盘轴系统的计算问题。

假如我们把研究的对象简化成如图所示的封闭盘轴系统,互相啮合的传动齿轮构成的分支节点为 H_1 和 H_2 ,主支有 N_1 个盘,分支有 N_2-2 个盘(因为从 N_1+1 到 N_1+N_2 这一分支中,两端点也就是主支的 H_1 和 H_2)。各盘、轴的序号如图所示。



用传递矩阵法计算固有频率的步骤是:对某一圆频率 P 值,假定初参数转角 A_0 和扭矩 M_0 ,从盘1开始递推计算到 H_1 ;再以 H_1 处的转角 $A(H_1)$ 和使 H_2 处转角

$A[H_2]$ 与 $N_1 + N_2$ 处转角 $A[N_1 + N_2]$ 相等为条件的某一扭矩值为初参数, 分别从 H_1 递推到 H_2 和从 $N_1 + 1$ 递推到 $N_1 + N_2$; 汇合后, 再以汇合的 H_2 处转角、扭矩为初参数, 从 H_2 递推到 N_1 。选不同的圆频率进行计算, 而使 N_1 处剩余扭矩 $R = 0$ 的频率值, 即为系统的某一阶固有频率。

这里关键问题是: 为了满足 $A[H_2] = A[N_1 + N_2]$, 从 H_1 和 $N_1 + 1$ 开始分别递推计算时的初始扭矩如何选择。显然, 这两个初始扭矩值之和应等于从盘 1 递推至 H_1 时的扭矩 $M[H_1]$ 。

可以设想一些计算方案: 比如任选一个扭矩值 MH_{01} , 然后以 $A[H_1]$ 和 MH_{01} 为初参数, 从 H_1 递推至 H_2 , 同时以 $A[H_1]$ 和 $MH_{02} = M[H_1] - MH_{01}$ 为初参数从 $N_1 + 1$ 递推至 $N_1 + N_2$, 选不同的 MH_{01} 值进行计算, 直到 $A[H_2]$ 与 $A[N_1 + N_2]$ 相等或近似相等为止; 或者以任选的 MH_{01} 得到的 $A[H_2]$, 令它等于 $A[N_1 + N_2]$, 反算出 MH_{02} , 看它是否等于 $M[H_1] - MH_{01}$, 或者进行其它的迭代计算, 但经试算其计算量实在太大。

我们可以找到一个简单的解决办法。由文献 [1], 链状结构任一点 i 的状态矢量 $\{V\}_i$ 可以表示为初参数 V_K^0 的线性函数, 即 $\{V\}_i = \sum_{K=K_1, K_2, \dots, K_m} V_K^0 \{V\}_i^{(K)} + \{V\}_i^{(0)}$ m 为链上各点的自由度数, $\{V\}_i^{(0)}$ 及 $\{V\}_i^{(K)}$ 分别为初参数 0 和 K 时 i 点的状态矢量, 对于扭振系统 $m = 1$, 则

$$\{V\}_i = V_K^0 \{V\}_i^{(K)} + \{V\}_i^{(0)}$$

对于从 H_1 (或 $N_1 + 1$) 开始的递推计算, $A[H_1]$ 是不变的, 转角 $A[H_2]$ 或 $A[N_1 + N_2]$ 应是各自初参数 MH_{01} 或 MH_{02} 的线性函数。即

$$A[H_2] = K_1 \cdot MH_{01} + A[H_2]^{(0)} \quad ①$$

$$A[N_1 + N_2] = K_2 \cdot MH_{02} + A[N_1 + N_2]^{(0)} \quad ②$$

$$K_1 = \frac{A[H_2]^{(1)} - A[H_2]^{(0)}}{M[H_1]} \quad ③$$

$$K_2 = \frac{A[N_1 + N_2]^{(1)} - A[N_1 + N_2]^{(0)}}{M[H_1]} \quad ④$$

式中, 上注角 (0) 表示初参数 MH_{01} 或 MH_{02} 等于 0 时的值, 上注角 (1) 表示初参数 MH_{01} 或 MH_{02} 等于 $M[H_1]$ 时的值。这样, 就可以求出满足 $A[H_2] = A[N_1 + N_2]$ 的合适的 MH_{01} 和 MH_{02} 值。考虑到 $MH_{01} + MH_{02} = M[H_1]$, 为使

$$K_1 \cdot MH_{01} + A[H_2]^{(0)} = K_2 \cdot MH_{02} + A[N_1 + N_2]^{(0)}$$

$$MH_{01} = \frac{K_2 \cdot M[H_1] + A[N_1 + N_2]^{(0)} - A[H_2]^{(0)}}{K_1 + K_2} \quad ⑤$$

$$MH_{02} = M[H_1] - MH_{01} \quad ⑥$$

这样, 令 $MH_{01} = 0$ 和 $MH_{01} = M[H_1]$, 相应的是 $MH_{02} = M[H_1]$ 和 $MH_{02} = 0$ 分别从 H_1 和 $N_1 + 1$ 各进行两次递推计算, 就可求得 $A[H_2]^{(0)}$ 、 $A[H_2]^{(1)}$ 、 $A[N_1 + N_2]^{(0)}$ 、 $A[N_1 + N_2]^{(1)}$ 值。用公式 ③、④ 算出 K_1 、 K_2 值, 用公式 ⑤、⑥ 就可算出合适的 MH_{01} 和 MH_{02} 值。以此合适的 MH_{01} 和 MH_{02} 值, 从 H_1 和 $N_1 + 1$ 各做一次递推计算, 就可找到 H_2 处合适的参数, 接着从 H_2 向 N_1 做递推计算。就是说, 对每一个试算的圆频率值, 在从 H_1 到 H_2 这个封闭环带上, 只要进行六次递推计算。

三、计算程序

根据上面得到的计算方法, 利用文献 [1] 给出的计算单支系统的程序段 PROC HO 可以编出计算封闭系统的程序段:

```
PROC FBXT;
BEGIN
REAL AH11, AH12, AH21, AH22,
```

```

    K1, K2, MH01, MH02;
    H0(1, H1, A01, 0);
    H0(H1 + 1, H2, A[H1] - F[H1] *
        M[H1], M[H1]);
    AH12 := A[H2];
    H0(H1 + 1, H2, A[H1], 0);
    AH11 := A[H2];
    H0(N1 + 2, N1 + N2, A[H1] - F[N1 +
        1] * M[H1], M[H1]);
    AH22 := A[N1 + N2];
    H0(N1 + 2, N1 + N2, A[H1], 0);
    AH21 := A[N1 + N2];
    K1 := (AH12 - AH11) / M[H1];
    K2 := (AH22 - AH21) / M[H1];
    MH01 := (K2 * M[H1] + AH21 -
        AH11) / (K1 + K2);
    MH02 := M[H1] - MH01;
    A[N1 + 1] := A[H1];
    H0(H1 + 1, H2, A[H1] - F[H1] *
        MH01, MH01);
    H0(N1 + 2, N1 + N2, A[H1] - F[N1
        + 1] * MH02, MH02);
    M[H2] := M[H2] + M[N1 + N2]
        - I[H2] * A[H2] * P * P;
    A[H2] := A[H2] - F[H2] * M[H2];
    H0(H2 + 1, N1, A[H2], M[H2]);
    R := M[N1];
    END;

```

上面程序段中，F为轴段的柔度，I为盘的转动惯量，AH11、AH12、AH21、AH22、K1、K2都是计算用系数。

文献〔1〕也给出了计算分支系统的程序段 PROC HOLZ 以及二分法试根的程序段 PROC FREQ。这样，我们就很容易编成能

计算单支、分支、封闭盘轴系统扭转振动固有频率的计算程序。其组成是：

```

    BEGIN
    对非局部量的说明;
    PROC HO(B,E,AO,MO);
    .....
    PROC HOLZ;
    .....
    PROC FBXT;
    .....
    PROC FREQ;
    .....
    READ(.....);
    FOR N:= 1 STEP 1 UNTIL NO DO
    BEGIN
        FREQ;
        打印输出语句;
    END END

```

为了与文献〔1〕对照，这里也一律用ALGOL 60算法语言。为了实用，也可以增加判断增根、打印振型、打印剩余扭矩曲线，观察R随P的变化情况等语句。

为了验证利用上面的程序对文献〔1〕上例10.2进行了计算。把该例的13盘单支系统人为地拆成分支、封闭系统，计算结果与原用矩阵迭代法的计算结果完全一致。也对某船用透平齿轮机组进行了计算，该机组具有功率分支二级减速齿轮箱，计算结果与实际情况符合。

参 考 文 献

〔1〕 郑兆昌主编。机械振动 上册。机械工业出版社，1986年3月
 〔2〕 许楚镇，张恒涛。汽轮发电机组轴系扭振事故剖析和技术开发展望。动力工程，1990，(2)

Calculation of Natural Frequency of Torsional Vibrations for an Enclosed Disc Shaft System

Su Wendou

(Heilongjiang Energy Research Institute)

Abstract

Based on the engineering practical needs, the author has made a preliminary study on the method for calculating the natural frequency of torsional vibrations of an enclosed disc shaft system with relevant calculation procedures being given.

Key Words: turbine, turbine disc, shaft system, torsional vibration, frequency calculation

(上接第35页)

参 考 文 献

- [1] 杜鸿家, 赵建平. 齿轮磨合表面粗糙度的模拟试验研究. 齿轮, 1988, (6)
- [2] 赵建平, 李应生, 杜鸿家. 优选齿轮磨合规范的模拟试验研究. 摩擦磨损, 1989, (3)
- [3] 杜鸿家, 赵建平. 变速箱齿轮润滑状态研究. 齿轮, 1988, (2)
- [4] 赵建平, 杜鸿家. 动态磨损量测量方法研究. 润滑与密封, 1989, (6)
- [5] (西德) 霍斯特·契可斯. 摩擦学—对摩擦、润滑和磨损科学技术的系统分析. 机械工业出版社, 1984

An Exploratory Study on Simulation Test Method for Tooth Flank Tribology of Involute Gears

Du Hongjia, Zhao Jianping

(Harbin Shipbuilding Engineering Institute)

Abstract

In this paper the authors expound the significance of a simulation test method for tooth flank tribology of involute gears, emphasizing that the key problem of such simulation tests lies in determining the simulation criteria and the conditions for their implementation.

Key Words: gear, tribology, simulation test