

三轴系统动态特性计算 机辅助分析与计算

杨 洪 波

摘要 论述了利用模态分析及模态综合手段,在CAD工作站上对三轴系统进行动态特性分析与计算。并在分析中将机械结构动力学特性和伺服控制系统频率特性统筹考虑,建立统一的数学模型。利用有限元分析程序分析计算,找出影响三轴系统动态刚度的敏感因子及薄弱环节,提出改善的途径。通过设计—分析—修改的迭代过程,逐步在设计阶段达到满意的设计方案。

关键词: 模态; 动态刚度; 固有频率

一、引 言

科学技术发展到今天,对于象天线位置控制系统、光电经纬仪,三轴系统等高精密度仪器的要求越来越高。它们不仅在结构上越来越复杂,而且对系统的精度、快速性及稳定性的要求也更加苛刻。机械结构和控制系统之间的相互影响越来越被人们重视。如要提高系统的快速性,就要求伺服控制系统有足够的伺服带宽,机械结构有足够的动态刚度,以保证系统的定位精度。因此必须从整个系统的角度去分析设计,这样才能更有效地提高整个系统的动态性能。

传统上,对于机电系统设计,缺乏统筹考虑。常常是机、电分开设计,控制系统的设计人员在分析设计时,常把机械参数理想化。例如:把传动系统的刚度看作无穷大,把机械结构看成是没有摩擦和间隙的理想环节等等。即使考虑这些参数,也只是停留在经验和估算上,把理想化的机械结构作为控制系统的负载并入控制回路进行分析计算,这样的分析结果与实际常常出现很大偏差。而且控制系统人员对结构因素到底对系统有多大的影响不甚了解,所以常常对机械结构设计提出过高的不切实际的要求。同样,机械结构设计人员也存在这样的问题,往往出于保险起见取较大的安全系数,致使结构尺寸和重量过大。另外,二者还都存在着无论在设计阶段还是在样机上对寻找其薄弱环节及敏感参数都很困难。这一难题人们总是希望在系统设计阶段能估算出系统的动态特性,诸如:自振频率,振型及伺服特性等,并探求机、电最佳参数,实现方案优化。本文就是立足于从系统的角度,研究如何进行系统的动态特性分析,将机、电统筹考虑,注重整体效果,利用有限元的模态分析与综合手段将机械各子结构和控制系统耦合在一起进行分析求解,得到系统的固有频率,振型等参数,同时可找出影响系统稳定性的薄弱环节及敏感参数。

二、模态分析与综合技术

以往对于一个简单的机械构件,利用有限元法进行分析计算,在物理座标系下可以计算出它的自振频率与振型。但对于一个复杂构件,乃至一个系统,为了准确描述这个复杂系统,在进行有限元网格划分时,势必要取相当数量的节点,而每个节点对应应有6个自由度,那么在物理座标系下建立动力学方程,自变量的数量是相当庞大的,要花费相当多的机时和存贮空间去计算,甚至无法计算,对系统的综合就更为困难。

模态分析与综合技术的基本思想是按工程观点或结构的几何形式,并遵循某些原则与要求把复杂的整体结构动力分割为若干子结构。然后针对各个子结构的具体特点分别进行有限元分析计算建模或通过实验测试获得模态信息。以少量的振动模态作为自由度,建立模态座标系。不仅可实现刚度阵,质量阵的对角化,达到去耦目的,使进行复杂庞大的计算成为可能,同时利用有限元灵活的计算技巧将机电系统的各部分加以模拟。然后通过模态综合手段将结构与控制系统相应的模型转换到模态座标系下组装成整个系统进行综合分析计算。从而得到系统的动态特性。

任何一个构件或系统都可以在不同座标系下加以描述。以在各自由度方向的位移作为基底建立的座标系称为物理位置座标系统,以构件或系统的振型(特征向量或称为模态)作为基底建立的座标系统称为模态座标系统)。

以一个具有 n 个自由度的自由振动系统为例。在物理位置座标系统下,其运动方程可描述为:

$$m\{\ddot{x}\} + k\{x\} = 0 \quad (1)$$

或写成:

$$\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & \cdots & m_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ m_{n1} & m_{n2} & \cdots & m_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \cdots \\ \ddot{x}_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdots & k_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

其中: m —质量阵, k —刚度阵, $\{x\}$ —位置列阵。

在模态座标下可描述为:

$$\begin{bmatrix} \ddots & & 0 \\ & m_i & \\ 0 & & \ddots \end{bmatrix} \{\ddot{q}\} + \begin{bmatrix} \ddots & & 0 \\ & k_i & \\ 0 & & \ddots \end{bmatrix} \{q\} = 0 \quad (2)$$

其中:

$$\begin{bmatrix} \ddots & & 0 \\ & m_i & \\ 0 & & \ddots \end{bmatrix} \text{和} \begin{bmatrix} \ddots & & 0 \\ & k_i & \\ 0 & & \ddots \end{bmatrix} \text{分别称为第} i \text{阶模态质量阵和模态刚度阵。}$$

在实际工程计算中,人们一般只对大型复杂结构系统的几个低阶固有频率和相应振型(模态)感兴趣,一般 $i \leq 3$ 。这样会大大降低运算规模,同时,由于各子结构最终都会转换为在同一模态向量表示,便于进行动力学系统组装,最终对整个系统进行分析计算。

三、三轴系统数学模型建立

三轴系统是用于模拟星光位置的高精密设备。它主要由左支架(LZJ),右支架(RZJ),

外框(WK)，内框(NK)构成的机械系统和由力矩电机，测速机、放大器等构成的伺服控制系统两大部分所组成。图1给出了三轴系统结构示意图，图2是该系统的方框图。

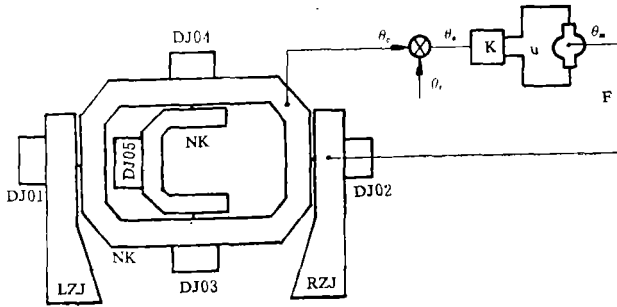


图1 三轴系统结构示意图

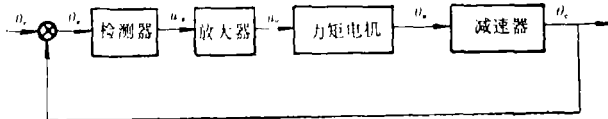


图2 系统方框图

控制系统应有控制外框，内框，仪器自转三个控制环，图中只给出了控制外框的控制环。

由支架，内框，外框构成的机械系统我们利用有限元法可求出动力学矩阵方程式：

$$m\{\ddot{u}\} + B\{\dot{u}\} + k\{u\} = \{P\} \quad (3)$$

式中 m 、 B 、 k 分别为质量阵、阻尼阵、刚度阵。 u 为位移向量， P 为载荷向量。

对于控制系统，设以角位移 θ_e 为输入量，以力矩电机的输出力矩 M_m 为输出量，则有：

$$J_m n \frac{d^2 \theta_e}{dt^2} + F_m n \frac{d \theta_e}{dt} + C_a k_a k_f \theta_e = M_m \quad (4)$$

其中： $C_a = \frac{k_a}{R_a}$ ； $F_m = f_m + \frac{k_a k_b}{R_a}$

J_m ， f_m ——电机的电枢转动量，粘滞阻尼总数。

k_a ， R_a ， k_b ——电机力矩常数，电枢电阻，反电动势常数。

表1 三轴系统机电相似量

机械系统	控制系统
m (质量)	$J_m n$
B (阻尼)	$F_m n$
k (刚度)	$C_a k_a k_f$

比较(3)，(4)式，二者的数学表示形式相同，列出它们对应的相似量于表1中。

可以看出，对于三轴系统，由于机，电系统之间在物理意义上存在着耦合关系，并在(4)式中 $J_m n$ 体现了控制系统的广义质量物理特征， $F_m n$ 体现了广义阻尼物理特征， $C_a k_a k_f$ 体现了广义刚度物理特征。我们

完全可以将二者耦合在一起分析整个系统，当然机电在信息流的传递上本身可构成闭环系统，所不同的是机械构件之间相互作用是双向的。其 M 、 B 、 K 都是对称矩阵，而它是单向的，但我们完全可以用一个非对称矩阵的结构单元来模拟它。这样对系统各部分分别用模态坐标表示后，就着手对整个系统进行动力学系统组装，其系统模态综合方程为：

$$[k + BP + MP^2]\{u\} = \{P\} \quad (5)$$

其中，各参数中都包含有模拟控制系统的广义参数。

四、三轴系统计算结果与分析

(1) 分析计算内容

- 三轴系统的前三阶固有频率及其相应的振型。
- 通过对固有频率与振型的分析，找出影响系统动态刚度的薄弱环节。

(2) 分析计算力模型

• 支架。根据结构特点，单元类型采用三角形或四边形薄壳单元。电机DJ01，DJ02由于刚度较大，可被为刚体，与支架固定连接，约束是支架与底座的连接点处，6个自由度全部约束。为使矩阵方程不产生奇异，把所有四边形单元的第6自由度全部约束掉。划分约的节点总数为72个，单元总数为109个，材料和物理属性见表2。

• 外框。单元类型采用四边形薄壳单元，电机DJ03，DJ04分别视为刚体处理，并固定连接于外框上。划分节点总数为156个，单元总数168个。为使计算规模减小，对外框的有限元模型进行了GUYAN缩约，主节点减少到64个。材料和物理属性见表2。

• 内框。单元类型采用四边形薄壳单元，电机DJ05和测速机分别视为刚体处理，并固定连接于内框上，划分节点总数为92个，单元总数为98个，同样，内框模型也作了GUYAN缩的，主节点减少到40个。材料和物理属性见表2。

表 2 材料、物理属性表

构件	类别 物型量 材料	材 料 属 性				物 理 属 性	
		杨氏模量 E	泊 松 比	密度 ρ	温度常数	壁 厚	筋 厚
		10^9N/mm		10^{-6}kg/mm		mm	mm
内框	2L40(S) 铝合金	0.745	0.3	2.7	0.0	20	20
外框	35# 钢	1.96	0.3	7.8	0.0	6	6
支架	HT20-40 灰铸铁	1.2	0.3	7.0	0.0	25	25

• 控制系统模拟。利用自行开发的控制系统模拟分析计算程序SVSM计算出广义质量 m_i ，广义阻尼 b_i ，广义刚度 k_i ，见表3电参数及广义参数。

• 三轴系统。根据分析目标，在APOLLO CAD工作站上，先采用SDRC-IDEAS软件的功能模块对SUPERTAB对各机械子结构进行有限元网格划分并分析计算。然后在SYS-

表 3 电参数及广义参数

	J_m	f_m	K_s	R_s	K_b	K_e	K_f	广义质量	广义阻尼	广义刚度
外控制框环	848.75	0.7	200	5	20	16.4	20.7	648.75	800.7	13579
内控制框环	261.12	0.97	1300	7.2	13	16.4	44.6	261.12	2348.192	132065

TAN功能模块中, 利用该软件提供的轴承连接器, 将其组装成整个系统, 图3为三轴系统有限元力学模型示意图。

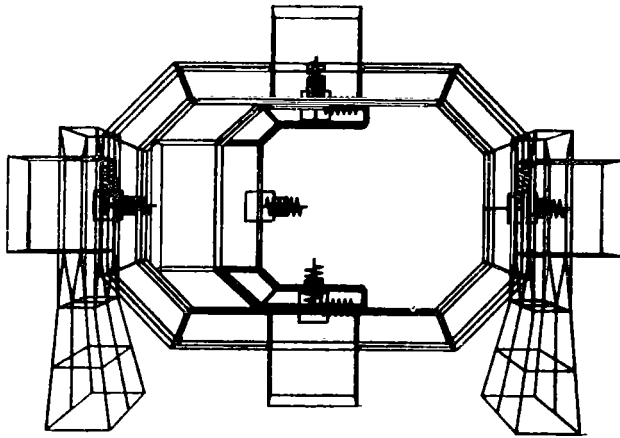


图 3 三轴系统有限元力学模型

(3) 计算结果与分析

根据上述建立的力学模型, 在APOLLO CAD工作站上, 用SYSTAN功能模块对三轴系统机械部分及机电耦合后系统分别进行了计算。计算结果见表4

表 4 系统计算结果

	$f_1(\text{Hz})$	$f_2(\text{Hz})$	$f_3(\text{Hz})$	正交比
机械系统	93	100	107	8.5617E-107
机电耦合的三轴系统	74	95	102	2.835E-124

为了更清楚地说明问题给出前三阶振型图。

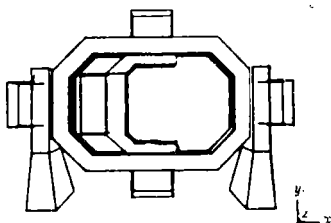


图 4 未变形图

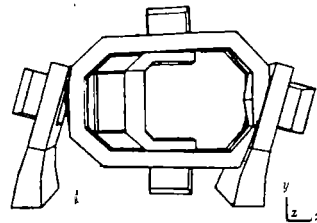


图 5 系统一阶振型图

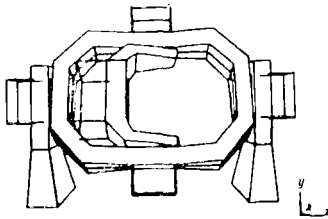


图6 系统二阶振型图

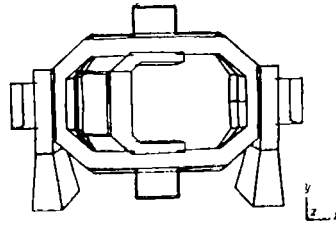


图7 系统三阶振型图

从计算结果可以得出下列结论：组装成系统后，尤其将伺服控制部分耦合进系统后，固有频率有所下降。这说明机械构件之间，机械构件和控制系统之间都存在相互作用和相互影响，它们相互的协同作用影响着整个系统的性能。

从振型中可看出：

第一振型，系统以 y 轴为对称轴左右摆动。

第二振型，中框，外框绕轴扭振。

第三振型，中框，外框成对称的振动。

从振型分析可知，结构刚度最薄弱的地方是支架中部。虽然结构都是以对称形式出现，刚性显得好些，不过在第一阶振型中，这一薄弱环节表现比较明显，使局部频率下降，从而影响了系统的固有频率。另外，在支架和外框，外框和中框的连接处也显得刚度差一些。对振型图中的薄弱环节进行改进，如适当增加厚度或在适当位置加筋，可使系统固有频率得到改善。见表5。将控制系统组装在系统模型中，实际就相当于对机械结构加了一个激励载荷，系统固有频率会下降。但它却更加逼近系统在工作状态时的真正频率。为了找出电参数对系统性能的影响，可变换各种电参数的值，反复多次地进行模拟计算，以确定最佳的电参数，使系统性能得到改善。见表5。

表5 三轴系统动态特性改善比较表

	修改前	改进后	说明
$f_1(\text{Hz})$	73	79	在支架中部加筋
$f_2(\text{Hz})$	95	95	
$f_3(\text{Hz})$	102	102	
$f_1(\text{Hz})$	73	91	减小电机电枢的转动惯量 J_m 和增大放大系数 K_I
$f_2(\text{Hz})$	95	113	
$f_3(\text{Hz})$	102	121	

由于在计算中，只取前3阶振型，在系统综合时，必然要损失一些“剩余质量”或“剩余柔”，使计算结果偏高一些。另外，由于在系统中还存在摩擦，间隙等一些复杂的非线性因素，使计算结果有些误差，但总的来说是比较接近实际结果的，特别是系统的振动姿态基本上反映了系统的振动特性。

五、结束语

利用先进的计算手段从系统的角度进行动态特性分析计算，在国内外已受到人们的重

视。它的实际意义就在于可以在复杂系统设计初期,找出影响系统性能的薄弱环节及敏感参数便于快速地对方案进行多次修改,最后形成最优方案。缩短了研制周期,降低了成本,使设计趋于合理。通过将三轴系统一阶固有频率的计算结果与实际测试结果(68Hz)相比较,数值比较接近。随着工程分析人员实际经验不断积累和丰富及应用软件的进一步开发。必将有效地为工程实践服务。

参 考 文 献

- [1] J.W.Young; Computer in Mechanical Engineering, January 1986
- [2] SDRG User Guide Levels; <Systan Engineering System Dynamics> 1986
- [3] 孙晴民主编;《机床结构计算的有限元法》,机械工业出版社,1981
- [4] 卢铿; 光学机械, 1989 No.3
- [5] 刘强, 吴凤高; 自动化学报, 1989, 第13卷, 第5期,

Computer-Aided Engineering Analysis and Calculation of Dynamical Character for 3-Aixe System

Yang Hongbo

Abstract

In this paper the dynamical character analysis and calculation is described according to modal analyses and modal synthesis on the CAD station. Both dynamical behavior of mechanical structure and frequency character of servo system are taken into consideration simultaneously, the unified mathematical model is founded. By calculation using FEA program, the sensitive factor and weak spots to affect dynamical stiffness of 3-Aixe system can be found out. The way of improving can be carried out. Through design and analysis iteration, the satisfied design scheme can be approached in the course of design.