

【制造技术】

大功率船用齿轮箱的有限元分析*

薛显光, 米林, 康洪涛, 马亚洲

(重庆理工大学 重庆汽车学院, 重庆 400050)

摘要:为分析某大功率船用齿轮箱的振动噪声原因,研究其固有特性,分别采用有限元法和实验模态分析法对齿轮箱体进行了模态分析,并对分析结果进行了对比,验证了有限元模型的正确性。同时,还得出了该箱体前10阶固有频率和振型,找出了振动噪声在结构上的原因,为齿轮箱的改进设计提供依据。

关键词:齿轮箱;有限元;模态分析

中图分类号:TH132

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2010)05-0056-04

随着全球经济一体化进程的发展,船舶运输业尤其是远洋运输业得到了迅速发展,人们对大型运输船舶的需求量也越来越大。同时,随着人们生活水平的提高,人们对船舶的性能也提出了更高的要求。船舶的舒适性是衡量船舶性能的一项重要指标,他在很大程度上受着振动噪声的影响。船舶的振动和噪声除了来自发动机外,很大一部分也来源于齿轮箱。因此,对船用齿轮箱的振动噪声进行研究已正成为目前的一个热点。

某企业新开发的一款大功率船用齿轮箱在工作过程中发现,其下箱体局部有较为明显的振动,这影响了用户对舒适性的要求。为此,本文中拟通过对齿轮箱进行有限元模态分析,以研究齿轮箱的固有特性,分析其振动产生的原因,为改进齿轮箱设计、减小振动噪声提供依据。

1 齿轮箱体有限元模型的建立

固有特性是振动系统的动态特性之一,主要包括固有频率和振型。模态分析技术是研究振动系统固有特性的重要工具,可分为理论模态分析和实验模态分析。而有限元法则是成熟的理论模态分析方法,本文中拟采用 Hypermesh 软件对齿轮箱体进行有限元模态分析,以求解其固有特性。

1.1 齿轮箱体几何模型的建立

要得到比较准确的理论模态分析结果,首先必须建立齿轮箱体的精确模型。为此,可依据齿轮箱的 CAD 二维图纸,利用 UG 对其进行三维建模。由于整个箱体结构比较

复杂,分为上箱体、中箱体、下箱体以及一些轴承座和轴承端盖等部分,因此,为保证网格划分的顺利进行,合理缩小求解规模,建模时忽略了一些对箱体固有特性影响甚微的结构,如小凸台、沉孔、螺纹、油孔、沟槽以及棱边等,得到了图1所示的齿轮箱体三维模型。

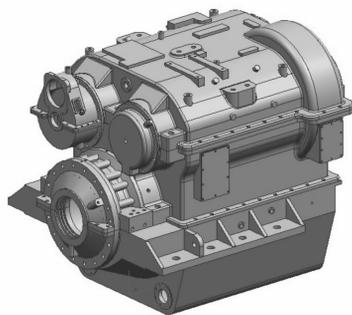


图1 齿轮箱体实体模型

1.2 齿轮箱体有限元模型的建立^[1-3]

由于箱体的主体部分为铸造实体,材料为 HT250,密度 $\rho = 7.8 \text{ kg/cm}^3$,弹性模量 $E = 210 \text{ GPa}$,故在 Hypermesh 软件中采用 Tetra4 四面体实体单元划分网格,划分完成后共包含 716 010 个单元、204 101 个节点。为了较为准确地模拟实际箱体,在上、中、下各箱体间采用了梁单元进行连接,而其余各部件则由螺钉孔与 3 个箱体进行刚性连接,共有梁单元 234 个, MPC 242 个。参照齿轮箱的实际安装情况,可确定齿轮箱的约束条件为:下箱体两侧翼 8 个螺栓孔施加全约束。完成后的有限元网格模型如图 2 所示。

* 收稿日期:2010-03-09

基金项目:重庆市科技攻关计划项目(CSTC,2007AB3030)

作者简介:薛显光(1983—),男,硕士研究生,主要从事机电一体化和振动噪声控制研究。

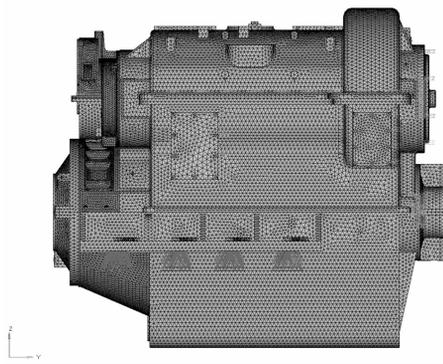


图2 齿轮箱体有限元模型

2 齿轮箱体理论模态分析

2.1 齿轮箱体模态分析原理^[4-7]

齿轮箱体是一个多自由度的弹性结构。将箱体按某种方式离散,则离散后的齿轮箱体结构是一个多自由度的系统。由弹性力学有限元方法可得出齿轮箱体的运动微分方程为

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

式中: $\{x\}$ 为广义坐标的位移列阵; $[K]$, $[M]$ 和 $[C]$ 为与 $\{x\}$ 相对应的刚度矩阵、质量矩阵和阻尼矩阵; $\{\dot{x}\}$, $\{\ddot{x}\}$ 分别为速度列阵和加速度列阵; $\{F(t)\}$ 为车架所受的外部载荷列阵。

若无外力作用,即 $\{F(t)\}=0$,则在求解结构的自由振动频率和固有振型,即求解结构的固有频率和固有振型时,阻尼对他们影响不大,因此阻尼量可以略去。对于无阻尼的自由振动系统,式(1)可以简化为

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0 \quad (2)$$

由于弹性体的自由振动总可以分解为一系列简谐振动的迭加,因此可以设式(2)的解为

$$\{u\} = \{f\} e^{i\omega t} \quad (3)$$

式中: $\{f\}$ 为系统自由振动时的振幅列阵向量。将式(3)代入式(2),有

$$([K] - \omega^2 [M])\{f\} = 0 \quad (4)$$

式(4)即为系统的特征方程。故求解结构的固有频率和固有振型的问题就是求解方程(4)的特征值和特征向量的问题。 ω^2 称为特征值, $\{f\}$ 称为对应特征值的特征向量。

由线性代数理论可知,使方程(4)有非零解的充分必要条件是

$$|[K] - \omega^2 [M]| = 0 \quad (5)$$

由于结构离散后有 n 个自由度,则 $[K]$ 和 $[M]$ 有 n 阶方阵,故求解式(5)即可得到结构的 n 阶固有频率和振型。

将式(5)展开后,可求得 N 个特征值 ω_r^2 ($r=1,2,3,\dots,N$),其平方根 ω 即为系统的固有频率,按大小顺序为

$$\omega_1 < \omega_2 < \dots < \omega_N \quad (6)$$

其中: $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N$ 分别称为1阶,2阶, \dots , N 阶固有频率。

将每个特征值 ω_r^2 代入式(6),均可求得1个相对应的特征向量 $\{\varphi_r\}$,他满足

$$([K] - \omega_r^2 [M])\{\varphi_r\} = \{0\}, (r = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (7)$$

这个向量即为系统的特征向量。由于他是系统模态振动的变形形状,故特征向量也即是所谓的模态,也称作振型,

由于 Lanczos 法的特征值、特征向量求解精度高,故在 Hypermesh 中使用 Lanczos 法计算齿轮箱体的固有特性。由于使用了 Sturm 序列检查,因此在用户感兴趣的频率范围内,每个漂移点处如果不能找到所有的特征根, Lanczos 法就会给出提示信息,可避免丢根现象。Lanczos 法适应面广,对于所有的中型及大型结构问题,均能给出很好的结果。

2.2 齿轮箱体理论模态计算结果

齿轮箱体的前10阶固有频率如表1所示。

表1 齿轮箱体前10阶固有频率

阶数	1	2	3	4	5
f/Hz	95	125	127	137	203
阶数	6	7	8	9	10
f/Hz	207	224	235	257	285

齿轮箱体的前10阶振型如图3~12所示。从图3~图12可以看出,箱体的固有频率分布比较密集,这与箱体结构的复杂性相对应,说明了箱体的整体结构对称性较好。同时,各阶固有频率均避开了各传动轴转频和齿轮啮合频率,故正常运转时不会产生共振,箱体的固有特性比较稳定。从齿轮箱体的各阶振型来看,第2,3,5阶下箱体内部轴承座局部振动较为明显,表明振动对支撑其悬置的两侧板的强度有较大影响。由于施加约束的下箱体侧翼板偏向输出轴端,故这种轴向不对称性使得上顶面、输入端,尤其是下底面的变形和振动远较输入端大。这与企业所提出的实际振动较大的位置相一致。而对于内部轴承座,由于悬置的两侧板强度不够,故会造成局部振动;同时下箱体底面的强度也不够,故会产生向内的振动。为减小振动噪声,可以针对这2个部位采取相应措施,如增大壁厚、加筋等,以增加其强度。

Control File
Eigen-Extraction
Analysis System
#1 10000000
#2 10000000
#3 10000000
#4 10000000
#5 10000000
#6 10000000
#7 10000000
#8 10000000
#9 10000000
#10 10000000
#11 10000000
#12 10000000
#13 10000000
#14 10000000
#15 10000000
#16 10000000
#17 10000000
#18 10000000
#19 10000000
#20 10000000
#21 10000000
#22 10000000
#23 10000000
#24 10000000
#25 10000000
#26 10000000
#27 10000000
#28 10000000
#29 10000000
#30 10000000
#31 10000000
#32 10000000
#33 10000000
#34 10000000
#35 10000000
#36 10000000
#37 10000000
#38 10000000
#39 10000000
#40 10000000
#41 10000000
#42 10000000
#43 10000000
#44 10000000
#45 10000000
#46 10000000
#47 10000000
#48 10000000
#49 10000000
#50 10000000
#51 10000000
#52 10000000
#53 10000000
#54 10000000
#55 10000000
#56 10000000
#57 10000000
#58 10000000
#59 10000000
#60 10000000
#61 10000000
#62 10000000
#63 10000000
#64 10000000
#65 10000000
#66 10000000
#67 10000000
#68 10000000
#69 10000000
#70 10000000
#71 10000000
#72 10000000
#73 10000000
#74 10000000
#75 10000000
#76 10000000
#77 10000000
#78 10000000
#79 10000000
#80 10000000
#81 10000000
#82 10000000
#83 10000000
#84 10000000
#85 10000000
#86 10000000
#87 10000000
#88 10000000
#89 10000000
#90 10000000
#91 10000000
#92 10000000
#93 10000000
#94 10000000
#95 10000000
#96 10000000
#97 10000000
#98 10000000
#99 10000000
#100 10000000
#101 10000000
#102 10000000
#103 10000000
#104 10000000
#105 10000000
#106 10000000
#107 10000000
#108 10000000
#109 10000000
#110 10000000
#111 10000000
#112 10000000
#113 10000000
#114 10000000
#115 10000000
#116 10000000
#117 10000000
#118 10000000
#119 10000000
#120 10000000
#121 10000000
#122 10000000
#123 10000000
#124 10000000
#125 10000000
#126 10000000
#127 10000000
#128 10000000
#129 10000000
#130 10000000
#131 10000000
#132 10000000
#133 10000000
#134 10000000
#135 10000000
#136 10000000
#137 10000000
#138 10000000
#139 10000000
#140 10000000
#141 10000000
#142 10000000
#143 10000000
#144 10000000
#145 10000000
#146 10000000
#147 10000000
#148 10000000
#149 10000000
#150 10000000
#151 10000000
#152 10000000
#153 10000000
#154 10000000
#155 10000000
#156 10000000
#157 10000000
#158 10000000
#159 10000000
#160 10000000
#161 10000000
#162 10000000
#163 10000000
#164 10000000
#165 10000000
#166 10000000
#167 10000000
#168 10000000
#169 10000000
#170 10000000
#171 10000000
#172 10000000
#173 10000000
#174 10000000
#175 10000000
#176 10000000
#177 10000000
#178 10000000
#179 10000000
#180 10000000
#181 10000000
#182 10000000
#183 10000000
#184 10000000
#185 10000000
#186 10000000
#187 10000000
#188 10000000
#189 10000000
#190 10000000
#191 10000000
#192 10000000
#193 10000000
#194 10000000
#195 10000000
#196 10000000
#197 10000000
#198 10000000
#199 10000000
#200 10000000
#201 10000000
#202 10000000
#203 10000000
#204 10000000
#205 10000000
#206 10000000
#207 10000000
#208 10000000
#209 10000000
#210 10000000
#211 10000000
#212 10000000
#213 10000000
#214 10000000
#215 10000000
#216 10000000
#217 10000000
#218 10000000
#219 10000000
#220 10000000
#221 10000000
#222 10000000
#223 10000000
#224 10000000
#225 10000000
#226 10000000
#227 10000000
#228 10000000
#229 10000000
#230 10000000
#231 10000000
#232 10000000
#233 10000000
#234 10000000
#235 10000000
#236 10000000
#237 10000000
#238 10000000
#239 10000000
#240 10000000
#241 10000000
#242 10000000
#243 10000000
#244 10000000
#245 10000000
#246 10000000
#247 10000000
#248 10000000
#249 10000000
#250 10000000
#251 10000000
#252 10000000
#253 10000000
#254 10000000
#255 10000000
#256 10000000
#257 10000000
#258 10000000
#259 10000000
#260 10000000
#261 10000000
#262 10000000
#263 10000000
#264 10000000
#265 10000000
#266 10000000
#267 10000000
#268 10000000
#269 10000000
#270 10000000
#271 10000000
#272 10000000
#273 10000000
#274 10000000
#275 10000000
#276 10000000
#277 10000000
#278 10000000
#279 10000000
#280 10000000
#281 10000000
#282 10000000
#283 10000000
#284 10000000
#285 10000000
#286 10000000
#287 10000000
#288 10000000
#289 10000000
#290 10000000
#291 10000000
#292 10000000
#293 10000000
#294 10000000
#295 10000000
#296 10000000
#297 10000000
#298 10000000
#299 10000000
#300 10000000
#301 10000000
#302 10000000
#303 10000000
#304 10000000
#305 10000000
#306 10000000
#307 10000000
#308 10000000
#309 10000000
#310 10000000
#311 10000000
#312 10000000
#313 10000000
#314 10000000
#315 10000000
#316 10000000
#317 10000000
#318 10000000
#319 10000000
#320 10000000
#321 10000000
#322 10000000
#323 10000000
#324 10000000
#325 10000000
#326 10000000
#327 10000000
#328 10000000
#329 10000000
#330 10000000
#331 10000000
#332 10000000
#333 10000000
#334 10000000
#335 10000000
#336 10000000
#337 10000000
#338 10000000
#339 10000000
#340 10000000
#341 10000000
#342 10000000
#343 10000000
#344 10000000
#345 10000000
#346 10000000
#347 10000000
#348 10000000
#349 10000000
#350 10000000
#351 10000000
#352 10000000
#353 10000000
#354 10000000
#355 10000000
#356 10000000
#357 10000000
#358 10000000
#359 10000000
#360 10000000
#361 10000000
#362 10000000
#363 10000000
#364 10000000
#365 10000000
#366 10000000
#367 10000000
#368 10000000
#369 10000000
#370 10000000
#371 10000000
#372 10000000
#373 10000000
#374 10000000
#375 10000000
#376 10000000
#377 10000000
#378 10000000
#379 10000000
#380 10000000
#381 10000000
#382 10000000
#383 10000000
#384 10000000
#385 10000000
#386 10000000
#387 10000000
#388 10000000
#389 10000000
#390 10000000
#391 10000000
#392 10000000
#393 10000000
#394 10000000
#395 10000000
#396 10000000
#397 10000000
#398 10000000
#399 10000000
#400 10000000
#401 10000000
#402 10000000
#403 10000000
#404 10000000
#405 10000000
#406 10000000
#407 10000000
#408 10000000
#409 10000000
#410 10000000
#411 10000000
#412 10000000
#413 10000000
#414 10000000
#415 10000000
#416 10000000
#417 10000000
#418 10000000
#419 10000000
#420 10000000
#421 10000000
#422 10000000
#423 10000000
#424 10000000
#425 10000000
#426 10000000
#427 10000000
#428 10000000
#429 10000000
#430 10000000
#431 10000000
#432 10000000
#433 10000000
#434 10000000
#435 10000000
#436 10000000
#437 10000000
#438 10000000
#439 10000000
#440 10000000
#441 10000000
#442 10000000
#443 10000000
#444 10000000
#445 10000000
#446 10000000
#447 10000000
#448 10000000
#449 10000000
#450 10000000
#451 10000000
#452 10000000
#453 10000000
#454 10000000
#455 10000000
#456 10000000
#457 10000000
#458 10000000
#459 10000000
#460 10000000
#461 10000000
#462 10000000
#463 10000000
#464 10000000
#465 10000000
#466 10000000
#467 10000000
#468 10000000
#469 10000000
#470 10000000
#471 10000000
#472 10000000
#473 10000000
#474 10000000
#475 10000000
#476 10000000
#477 10000000
#478 10000000
#479 10000000
#480 10000000
#481 10000000
#482 10000000
#483 10000000
#484 10000000
#485 10000000
#486 10000000
#487 10000000
#488 10000000
#489 10000000
#490 10000000
#491 10000000
#492 10000000
#493 10000000
#494 10000000
#495 10000000
#496 10000000
#497 10000000
#498 10000000
#499 10000000
#500 10000000
#501 10000000
#502 10000000
#503 10000000
#504 10000000
#505 10000000
#506 10000000
#507 10000000
#508 10000000
#509 10000000
#510 10000000
#511 10000000
#512 10000000
#513 10000000
#514 10000000
#515 10000000
#516 10000000
#517 10000000
#518 10000000
#519 10000000
#520 10000000
#521 10000000
#522 10000000
#523 10000000
#524 10000000
#525 10000000
#526 10000000
#527 10000000
#528 10000000
#529 10000000
#530 10000000
#531 10000000
#532 10000000
#533 10000000
#534 10000000
#535 10000000
#536 10000000
#537 10000000
#538 10000000
#539 10000000
#540 10000000
#541 10000000
#542 10000000
#543 10000000
#544 10000000
#545 10000000
#546 10000000
#547 10000000
#548 10000000
#549 10000000
#550 10000000
#551 10000000
#552 10000000
#553 10000000
#554 10000000
#555 10000000
#556 10000000
#557 10000000
#558 10000000
#559 10000000
#560 10000000
#561 10000000
#562 10000000
#563 10000000
#564 10000000
#565 10000000
#566 10000000
#567 10000000
#568 10000000
#569 10000000
#570 10000000
#571 10000000
#572 10000000
#573 10000000
#574 10000000
#575 10000000
#576 10000000
#577 10000000
#578 10000000
#579 10000000
#580 10000000
#581 10000000
#582 10000000
#583 10000000
#584 10000000
#585 10000000
#586 10000000
#587 10000000
#588 10000000
#589 10000000
#590 10000000
#591 10000000
#592 10000000
#593 10000000
#594 10000000
#595 10000000
#596 10000000
#597 10000000
#598 10000000
#599 10000000
#600 10000000
#601 10000000
#602 10000000
#603 10000000
#604 10000000
#605 10000000
#606 10000000
#607 10000000
#608 10000000
#609 10000000
#610 10000000
#611 10000000
#612 10000000
#613 10000000
#614 10000000
#615 10000000
#616 10000000
#617 10000000
#618 10000000
#619 10000000
#620 10000000
#621 10000000
#622 10000000
#623 10000000
#624 10000000
#625 10000000
#626 10000000
#627 10000000
#628 10000000
#629 10000000
#630 10000000
#631 10000000
#632 10000000
#633 10000000
#634 10000000
#635 10000000
#636 10000000
#637 10000000
#638 10000000
#639 10000000
#640 10000000
#641 10000000
#642 10000000
#643 10000000
#644 10000000
#645 10000000
#646 10000000
#647 10000000
#648 10000000
#649 10000000
#650 10000000
#651 10000000
#652 10000000
#653 10000000
#654 10000000
#655

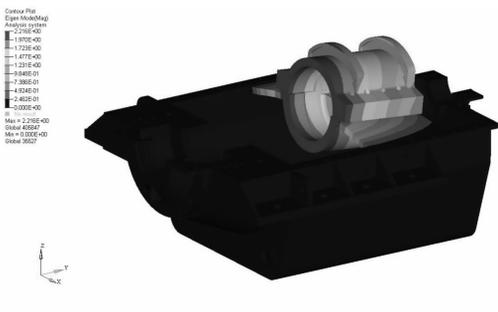


图4 第2阶振型——轴承座局部(输入端弯曲)

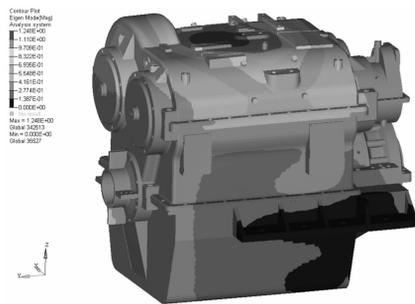


图8 第6阶振型——上箱体顶部向内振动

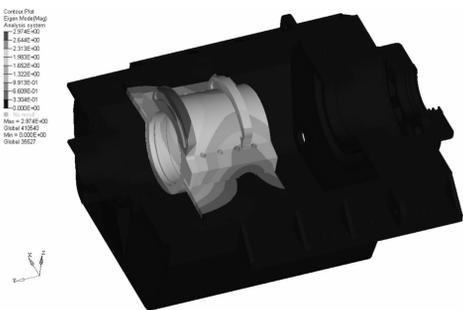


图5 第3阶振型——轴承座局部(输出端弯曲)

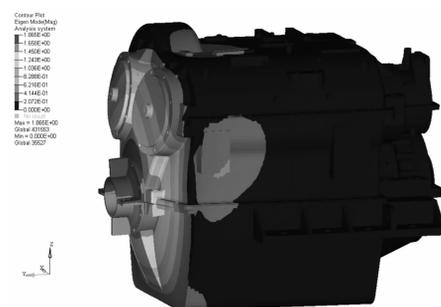


图9 第7阶振型——输入端向内振动

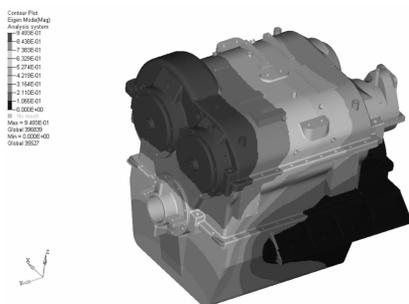


图6 第4阶振型——横向弯曲

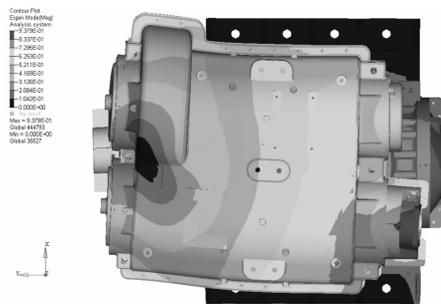


图10 第8阶振型——轴向弯曲

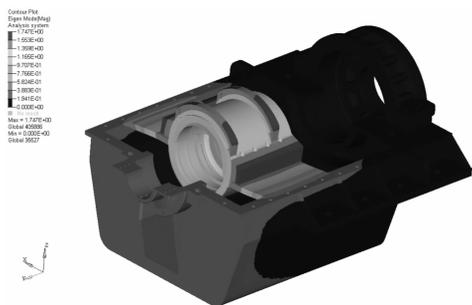


图7 第5阶振型——轴承座局部(扭振)

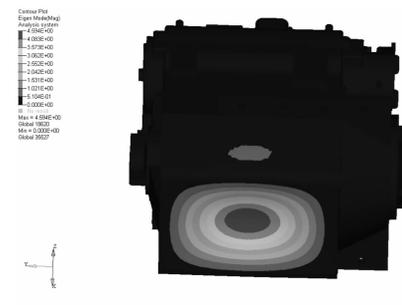


图11 第9阶振型——下箱体底部向内振动

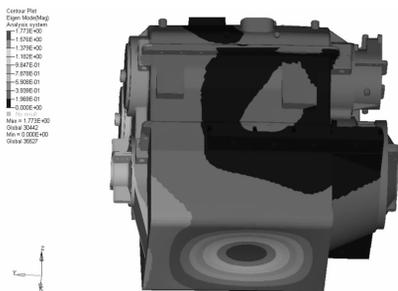


图12 第10阶振型——整体垂直弯曲、下箱体底部向内振动

3 齿轮箱实验模态分析

实验模态分析是对齿轮箱体进行实际测试,获得其固有频率的方法。由于该方法具有较高的可靠性,因而可将其结果与理论模态的分析结果进行比较,从而验证有限元模型的准确性。为此,本文中采用了冲击锤激励方式对齿轮箱表面结构施加脉冲激励力,并在箱体表面用加速度传感器采集响应信号。经信号处理和模态参数识别,可计算出齿轮箱体的前10阶固有频率,结果如表2所示。

阶数	1	2	3	4	5
f/Hz	102	131	136	146	198
阶数	6	7	8	9	10
f/Hz	217	235	247	268	294

比较表1和表2可知,各阶频率的误差均在10%以内,这表明理论模态分析有较好的精度,所建立的有限元模型正确,同时也进一步验证了本文中对振动噪声产生原因分析的正确性。

4 结束语

本文中使用了UG以及Hypermesh软件,对大功率船用齿轮箱体进行了实体建模和有限元建模,并以模态分析的基本理论和方法对齿轮箱体进行了有限元模态分析,得到了前10阶固有频率和前10阶振型。同时,根据模态分析结果对箱体的各部分结构做了分析,找出了振动较大的部位及其产生的原因,为改进箱体结构、减小振动噪声提供了重要依据。最后通过实验模态分析,对理论模态分析结果做了对比验证,从而证明了有限元模型的正确性和振动原因分析的依据性。建立起的有限元模型和计算出的重要模态参数,可为后续的齿轮箱体结构优化,深入研究其振动噪声问题打下基础。

参考文献:

- [1] 王立华,李润方,林腾蛟,等. 高速重载齿轮的有限元分析[J]. 中国机械工程,2003,14(20):1773-1778.
- [2] 李润方,陶泽光,林腾蛟,等. 齿轮系统有限元模态分析[J]. 机械设计与研究,2003,19(2):45-47.
- [3] 罗伯特·D·库克. 有限元分析的概念与应用[M]. 关正西,强洪夫,译. 西安:西安交通大学出版社,2007.
- [4] 曹树谦. 振动结构模态分析[M]. 天津:天津大学出版社,2001.
- [5] 薛延华. 齿轮箱箱体结构对其振动模态的影响研究[J]. 机械传动,2008,32(6):107-108.
- [6] 李绍彬. 齿轮减速器造型设计与模态分析[J]. 现代制造工程,2005(3):13-15.
- [7] 李静峰. 舰船齿轮箱箱体设计规范[J]. 四川兵工学报,2009(6):110-112.

(责任编辑 周江川)