

QJ

中华人民共和国航天行业标准

FL 1617

QJ 20292—2014

运载火箭结构动特性有限元模型检查方法

Finite element model checkout method for structural dynamic
characteristics of launch vehicle

2014—11—20 发布

2015—02—20 实施

国家国防科技工业局 发布

前 言

本标准的附录 A、附录 B 和附录 C 为资料性附录。

本标准由中国航天科技集团公司提出。

本标准由中国航天标准化研究所归口。

本标准起草单位：中国航天科技集团公司第一研究院第一设计部。

本标准主要起草人：李 宁、马 上、戴婷婷、潘忠文、王 旭、吕海波、李 明。

运载火箭结构动特性有限元模型检查方法

1 范围

本标准规定了运载火箭结构动特性有限元模型检查的一般要求、主要目的及内容、检查流程、单元划分检查、单元属性检查、模型质量特性检查、1g静力载荷检查和自由模态分析检查等内容。

本标准适用于运载火箭结构动特性有限元模型检查。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包含勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB/T 2298 机械振动、冲击与状态监测 语汇

QJ 645 航天飞行器力学环境术语

3 术语和定义

GB/T 2298、QJ 645确立的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1

自由度集 degree-of-freedom sets

Nastran有限元模型中的自由度根据在各类求解序列中进行处理被分为的不同组。

注：Nastran各自由度集的简介参见附录A。

3.2

残差 epsilon

Nastran线性求解中判断结果精度的指标。

3.3

最大比值 max ratio

Nastran模型刚度矩阵中对角线各项与矩阵三角化后的三角矩阵对角线相应项的比值的最大值。

3.4

振型 mode

指定节点的指定自由度无量纲归一化的特征向量按需要保留的子集，包括三个轴向位移和绕纵轴的转动部分。

3.5

振型斜率 slope of mode shape

与弯曲振型对应的结构横截面（或平面）法线方向的转角。

3.6

运载火箭结构动特性 structural dynamic characteristics of launch vehicle

运载火箭结构动力学特性的频率、振型、振型斜率、广义质量及阻尼等参数。

4 一般要求

4.1 使用 MSC.Patran 软件作为运载火箭结构动特性有限元模型（以下简称模型）检查的前、后处理工具。

4.2 一般使用 MSC.Nastran 2007 以后版本作为运载火箭结构动特性有限元模型检查工具。

4.3 最终版本的模型中不应使用 AUTOSPC 卡片。

4.4 最终版本的模型中如使用 BAILOUT 参数，其值应设置为 0。

5 主要目的及内容

5.1 主要目的

保证运载火箭结构动特性有限元模型在数学上的严谨性，模型刚度矩阵和质量矩阵不存在奇异，模型不存在任何非真实的多余约束。

5.2 主要内容

模型检查包括单元划分检查、单元属性检查、模型质量特性检查、1g静力载荷检查和自由模态检查等内容。

6 检查流程

模型检查按如下流程进行：

- a) 利用MSC.Patran进行单元划分检查；
- b) 利用MSC.Patran进行单元属性检查；
- c) 利用MSC.Patran进行模型质量特性检查；
- d) 利用MSC.Nastran进行1g静力计算检查；
- e) 利用MSC.Nastran进行自由模态分析检查。

7 单元划分检查

7.1 单元划分检查主要内容

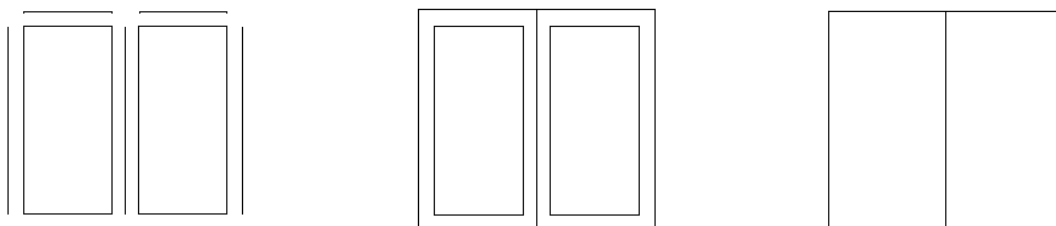
单元划分检查工作主要包括模型外观及单元连续性检查等内容。

7.2 外观检查

模型完成后，应利用前处理软件从多角度显示模型的整体外形及关键部位的细节形式。

7.3 单元连续性检查

模型应保证每一个单元均具有合理的连接关系，特别是对于沿壳单元边缘有梁单元的情况，应进行该检查。单元连续性检查使用MSC.Patran的“Verify/Element/Boundaries”命令进行。检查示例见图1。其中图1a)表示壳单元和梁单元均不连续；图1b)表示梁单元连续壳单元不连续；图1c)表示梁单元和壳单元都连续。



a) 壳单元和梁单元均不连续

b) 梁单元连续壳单元不连续

c) 壳单元和梁单元均连续

图1 单元连续性检查

7.4 重复单元检查

除特定情况外，模型中不应存在重复单元，如：同一节点存在两个以上质量单元或两个结点间存在两个以上梁单元等情况。重复检查使用MSC.Patran的“Verify/Element/Duplicates”命令进行。

8 单元属性检查

在MSC.Patran中显示所有单元，然后使用“Tool/List”命令显示所有已赋属性的单元，将其隐藏显示，则剩余的单元为无属性单元，正常情况下模型中不应存在无属性单元。

9 模型质量特性检查

9.1 模型质量特性检查原则

运载火箭结构动特性有限元模型中各部段结构模型的质量特性应与真实火箭部段结构的质量特性一致，主要的质量特性参数包括总质量、质心、转动惯量等参数，检查结果应与火箭的原始数据中相关内容一致。质量特性检查可以使用MSC.Patran和MSC.Nastran进行，如MSC.Patran和MSC.Nastran检查结果不一致时，应以MSC.Nastran检查结果为准。

9.2 MSC. Patran 模型质量特性检查

在有限元建模前处理阶段，可以使用MSC.Patran进行模型质量特性检查。MSC.Patran中使用Tools/Mass Properties菜单显示有各部段模型或整体模型的质量特性。MSC.Patran显示的模型典型质量特性参见附录B中B.1。

9.3 MSC. Nastran 模型质量特性检查

9.3.1 Grdpnt 卡片

在MSC.Nastran的bdf文件的数据模型集部分，可用“Param, Grdpnt”卡片输出模型的质量、质心、转动惯量及惯性主轴等参数，检查方法示例参见附录C中C.1和附录C中C.2。

检查结果见Nastran输出的f06文件，在f06文件中以“OUTPUT FROM GRID POINT WEIGHT GENERATOR”作为检查结果的标题。质量由“MASS”表示，质心由“X-C.G.”、“Y-C.G.”和“Z-C.G.”表示。对质心的主转动惯量由“I (Q)”表示。检查结果示例参见附录B中B.2。

9.3.2 Weightcheck 卡片

在MSC.Nastran的bdf文件的情况控制部分，可利用“Weightcheck”卡片可以检查模型各自由度集的质量特性。“Weightcheck”卡片与“Grdpnt”卡片相比可以检查更多自由度集，对g集以后各自由度集，可以计算质量相对g集的变化情况，检查方法示例参见附录C中C.1和附录C中C.2。

检查结果见Nastran输出的f06文件，在f06文件中以“OUTPUT FROM WEIGHT CHECK”作为检查结果的标题，质量由“MASS”表示，质心由“X-C.G.”、“Y-C.G.”和“Z-C.G.”表示。对质心的主转动惯量由“I (Q)”表示。n集自由度质量检查输出结果参见附录B中B.3。

10 1g 静力计算检查

10.1 检查内容

进行1g静力计算是在结构约束状态下，按照总体坐标系的三个坐标轴方向施加1g过载的静力计算。主要检查内容包括残差和最大比值检查，平衡检查、1g静力刚体检查等。检查示例参见附录C中C.1。

10.2 残差和最大比值检查

静力计算结果中会输出的残差和最大比值这两个参数，可以直接反应模型刚度矩阵的性质。这两个参数的参考量值见表1。

表1 残差和最大比值参考量值

参数	允许值	说明
残差 (Epsilon)	$\leq 1.0 \times 10^{-6}$	规模较大的模型
残差 (Epsilon)	$\leq 1.0 \times 10^{-9}$	规模较小的模型
最大比值 (Max Ratio)	$\leq 1.0 \times 10^7$	—

如果这两个参数的输出结果大于允许值，表明模型刚度矩阵有奇异，这两个参数的输出结果见Nastran输出的f06文件，残差的输出结果在f06文件中以“USER INFORMATION MESSAGE 5293”作为检查结果的标题，最大比值的输出结果在f06文件中以“SYSTEM INFORMATION MESSAGE 4159”作为检查结果的标题。检查结果示例参见附录B中B.4。

10.3 平衡检查

平衡检查是进行有限元模型检查的基本方法，通过平衡检查的模型表明其模型质量比较理想，可以提高求解精度。在MSC.Nastran 2004以上版本中，在bdf文件的情况控制部分，可利用“Equilibrium”卡片进行平衡检查，结果见Nastran输出的f06文件，平衡检查的输出结果在f06文件中以“EQUILIBRIUM CHECK”表示，输出结果中最后一行六个方向自由度的结果均应等于零。检查结果示例参见附录B中B.5。

10.4 1g 静力刚体检查

刚体检查可以发现模型的多余约束及刚度矩阵的病态，在MSC.Nastran 2004以上版本中，在bdf文件的情况控制部分，可利用“Groundcheck”卡片进行检查，结果见Nastran输出的f06文件，刚体检查的结果在f06文件中以“USER INFORMATION MESSAGE 7570”表示，其中g集自由度在六个方向均应通过检查，检查结果应显示为“PASS”。检查结果示例参见附录B中B.6。

11 自由模态分析检查

11.1 检查内容

自由模态分析检查主要包括频率结果检查、自由模态刚体检查和阵型显示等内容。检查示例参见附录C中C.2。

11.2 频率结果检查

自由模态分析是对无约束的有限元模型进行模态分析，是进行有限元模型检查的有效手段，运载火箭结构动特性有限元模型均应进行。自由模态分析计算结果中前6阶应为刚体自由度对应的零频。零频计算结果绝对值应小于 1.0×10^{-3} Hz。第7阶频率开始为计算模型自由状态各阶弹性固有频率。

Nastran输出的f06文件中，频率结果以“CYCLES”表示，结果示例参见附录B中B.7。

11.3 自由模态刚体检查

在静力计算的刚体检查中，部分自由度集因存在约束无法通过检查，在自由模态分析时各自由度集在六个方向均应通过刚体检查，检查方法见10.4。

11.4 振型显示

自由模态分析结束后，应在后处理软件中对模态计算的振型进行显示，判断各阶振型是否合理，以检查全箭结构动特性有限元计算结果的正确性。

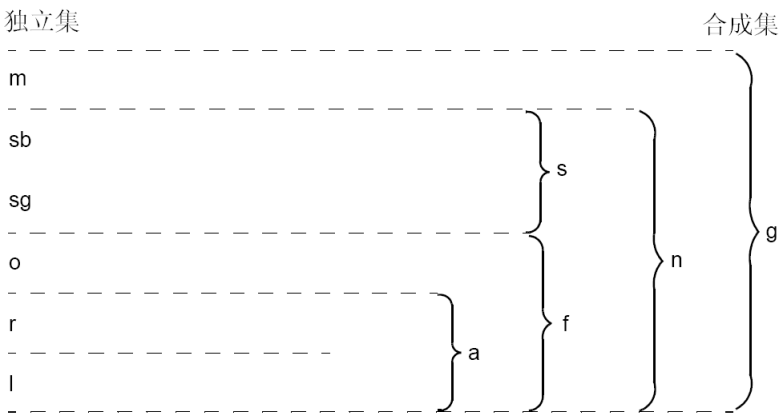
附 录 A
(资料性附录)

Nastran 自由度集简介

自由度集是Nastran有限元模型中的自由度根据在各类求解序列中进行处理被分为的不同组。Nastran中的自由度集分为两类，合成集（Combined sets）是由其他自由度集的集合构成的自由度集；独立集（Mutually exclusive sets）是指其包含的自由度不能属于其他的独立集。Nastran中主要有以下自由度集：

- a) g集：Nastran有限元模型中所有自由度组成的集合，处于自由度集的最顶端；
- b) m集：Nastran有限元模型中所有多点约束相关的非独立自由度组成的集合；
- c) n集：将m集从g集移除后剩余自由度组成的集合；
- d) sb集：由“param autospc”和“spci”卡片处理的自由度组成的集合；
- e) sg集：由“grid”卡片“field 8”位置定义的自由度组成的集合；
- f) s集：sb集和sg集组成的合集；
- g) f集：将s集从n集中移除后剩余自由度组成的集合；
- h) o集：对f集进行静态缩聚后移除的自由度组成的集合；
- i) a集：对f集进行静态缩聚后剩余自由度组成的集合；
- j) r集：在求解无约束结构时，用于帮助计算惯性力和平衡外载荷所用到的自由度组成的集合；
- k) l集：a集中去除r集外自由度组成的集合。

各自由度集的关系见图A.1。

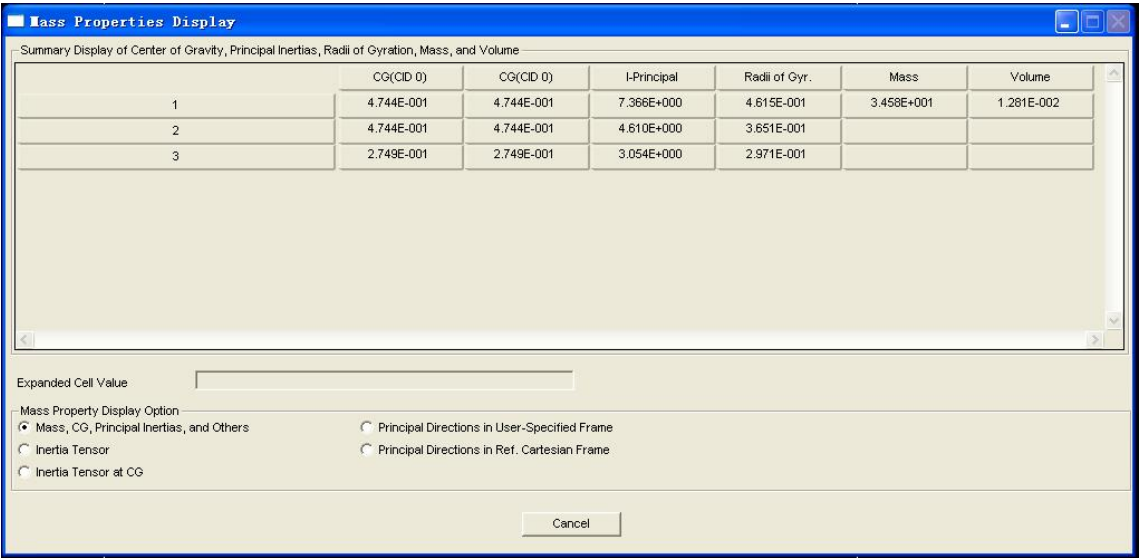


图A.1 Nastran 主要自由度集

附录 B
(资料性附录)
模型检查结果示例

B.1 MSC.Patran检查模型质量特性示例

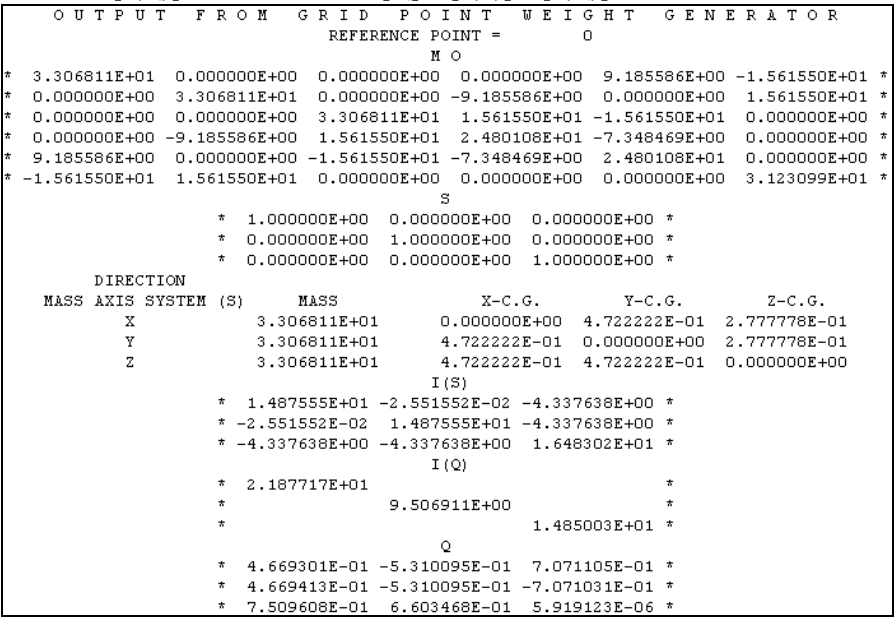
MSC.Patran显示模型典型质量特性示例见图B.1。



图B.1 MSC.Patran 显示模型典型质量特性

B.2 MSC.Nastran Grdpnt卡片检查模型质量特性示例

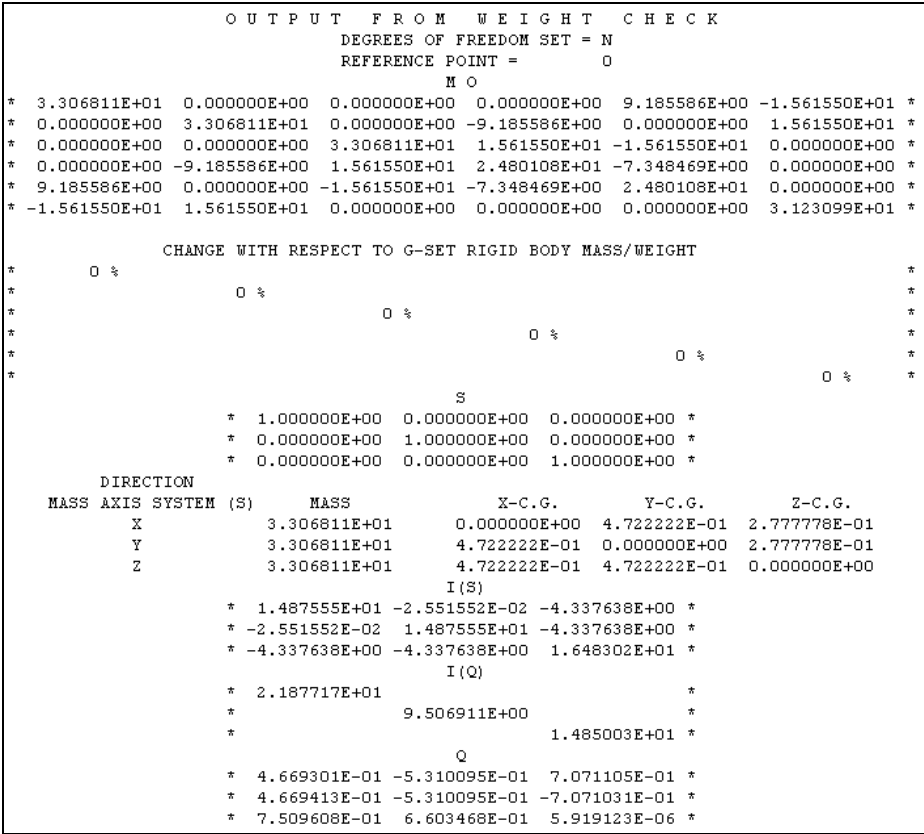
MSC.Nastran Grdpnt卡片检查模型质量特性示例见图B.2。图中“REFERENCE POINT”为参考点，[MO]为基础坐标系内相对参考点的刚体质量矩阵，[S]为由基础坐标系到结构惯性主轴的转换矩阵，“MASS”表示质量，“X-C.G.”、“Y-C.G.”和“Z-C.G.”表示三个质心的坐标，[I(S)]表示在基础坐标系内相对质心的惯性矩阵、[I(Q)]为主惯性矩阵、[Q]为[I(S)]到[I(Q)]的转换矩阵。



图B.2 Grdpnt 参数输出结果示例

B.3 MSC.Nastran Weightcheck卡片检查模型质量特性示例

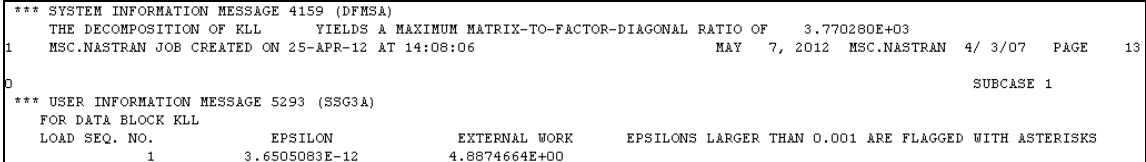
MSC.Nastran Weightcheck卡片检查模型n集自由度质量特性示例见图B.3。图中“REFERENCE POINT”为参考点，[MO]为基础坐标系内相对参考点的刚体质量矩阵，[S]为由基础坐标系到结构惯性主轴的转换矩阵，“MASS”表示质量，“X-C.G.”、“Y-C.G.”和“Z-C.G.”表示三个质心的坐标，[I(S)]表示在基础坐标系内相对质心的惯性矩阵、[I(Q)]为主惯性矩阵、[Q]为[I(S)]到[I(Q)]的转换矩阵。



图B.3 Weightcheck 卡片 n 集自由度质量检查结果示例

B.4 残差和最大比值检查结果示例

残差和最大比值检查结果示例见图B.4。



图B.4 残差（Epsilon）和最大比值（Max Ratio）检查结果示例

B.5 平衡检查结果示例

平衡检查结果示例见图B.5，输出结果中最后一行六个方向自由度的结果均应等于零。

E Q U I L I B R I U M C H E C K								
R E S U L T A N T L O A D S I N B A S I C C O O R D I N A T E S Y S T E M								
SUBCASE NO.	REFERENCE POINT	LOAD TYPE	T1	T2	T3	R1	R2	R3
1	ORIGIN	APP-LOAD	0.000000E+00	0.000000E+00	3.240675E+02	1.530319E+02	-1.530319E+02	0.000000E+00
		F-OF-SPC	-5.097565E-09	-2.060386E-09	-3.240675E+02	-1.530319E+02	1.530319E+02	9.456513E-10
		TOTALS	-5.097565E-09	-2.060386E-09	0.000000E+00	-1.525879E-05	1.525879E-05	9.456513E-10

图B.5 平衡检查结果示例

B.6 刚体检查结果示例

g集自由度刚体检查结果示例见图B.6，输出结果中六个方向均应通过检查。

*** USER INFORMATION MESSAGE 7570 (GPWG1D)		
RESULTS OF RIGID BODY CHECKS OF MATRIX KAA1 (A-SET) FOLLOW:		
PRINT RESULTS IN ALL SIX DIRECTIONS AGAINST THE LIMIT OF 3.179622E-02		
DIRECTION	STRAIN ENERGY	PASS/FAIL
-----	-----	-----
1	2.980232E-08	PASS
2	3.725290E-08	PASS
3	0.000000E+00	PASS
4	1.091394E-11	PASS
5	1.091394E-11	PASS
6	4.218055E-08	PASS

图B.6 g 集自由度刚体检查结果示例

B.7 自由模态频率检查结果示例

自由模态频率检查结果示例见图B.7，前六阶刚体频率结果均小于 1.0×10^{-3} Hz。

MODE NO.	EXTRACTION ORDER	EIGENVALUE	R E A L E I G E N V A L U E S		GENERALIZED MASS	GENERALIZED STIFFNESS
			RADIANS	CYCLES		
1	1	-1.428543E-08	1.195217E-04	1.902247E-05	1.000000E+00	-1.428543E-08
2	2	-1.187800E-09	3.446448E-05	5.485192E-06	1.000000E+00	-1.187800E-09
3	3	-1.364242E-11	3.693565E-06	5.878491E-07	1.000000E+00	-1.364242E-11
4	4	-9.094947E-12	3.015783E-06	4.799767E-07	1.000000E+00	-9.094947E-12
5	5	6.366463E-12	2.523185E-06	4.015774E-07	1.000000E+00	6.366463E-12
6	6	3.739842E-09	6.115425E-05	9.733001E-06	1.000000E+00	3.739842E-09
7	7	5.225439E+03	7.228720E+01	1.150486E+01	1.000000E+00	5.225439E+03
8	8	3.456790E+07	5.879448E+03	9.357431E+02	1.000000E+00	3.456790E+07
9	9	3.456790E+07	5.879448E+03	9.357431E+02	1.000000E+00	3.456790E+07
10	10	7.977208E+07	8.931521E+03	1.421496E+03	1.000000E+00	7.977208E+07

图B.7 自由模态频率检查结果示例

附 录 C
(资料性附录)
模型检查算例

C.1 1g静力计算检查bdf算例

```

$ Linear Static Analysis, Database
$定义静力求解
SOL 101
CEND
$ Direct Text Input for Global Case Control Data
$定义各自由度集质量特性检查
weightcheck(set=a,cgi=yes,mass)=yes
$定义各自由度集刚体检查
groundcheck(set=all)=yes
$定义平衡检查
equilibrium
TITLE = MSC.Nastran job created on 25-Apr-12 at 14:08:06
ECHO = NONE
SUBCASE 1
    TITLE=This is a default subcase.
    SPC = 2
    LOAD = 2
    SPCFORCES(SORT1,REAL)=ALL
$ Direct Text Input for this Subcase
BEGIN BULK
$ Direct Text Input for Bulk Data
$定义集质量特性检查
    param,grdpnt,0
    param,checkout,yes
PARAM      POST      0
PARAM      PRTMAXIM YES
$ Elements and Element Properties for region : p1
PSHELL    1          1          .01          1          1
$ Pset: "p1" will be imported as: "pshell.1"
CQUAD4     1          1          2          4          1          3
$ Referenced Material Records
$ Material Record : al
$ Description of Material : Date: 25-Apr-12          Time: 14:05:06
MAT1       1          7.+10          .3          2700.

```

```

$ Nodes of the Entire Model
GRID      1      1.      0.      0.
GRID      2      0.      1.      0.
GRID      3      0.      0.      0.
GRID      4      1.      1.      0.
$ Loads for Load Case : st1
SPCADD    2      1
LOAD      2      1.      1.      1
$ Displacement Constraints of Load Set : c1
SPC1      1      123456  4
$ Gravity Loading of Load Set : gz
GRAV      1      0      9.8      0.      0.      1.
$ Referenced Coordinate Frames
ENDDATA 3426a946

```

C.2 自由模态分析bdf示例

```

$ model_check mat_density=off checkout
$ Normal Modes Analysis, Database
$定义模态求解
SOL 103
CEND
$ Direct Text Input for Global Case Control Data
$定义各自由度集质量特性检查
weightcheck(set=all,cgi=yes,mass)=yes
$定义各自由度集刚体检查
groundcheck(set=all)=yes
TITLE = MSC.Nastran job created on 25-Apr-12 at 14:08:06
ECHO = NONE
RESVEC = NO
SUBCASE 1
    TITLE=This is a default subcase.
    METHOD = 1
    VECTOR(SORT1,REAL)=ALL
    SPCFORCES(SORT1,REAL)=ALL
$ Direct Text Input for this Subcase
BEGIN BULK
$ Direct Text Input for Bulk Data
PARAM     POST      0
PARAM     PRTMAXIM YES

```


中华人民共和国航天行业标准

**运载火箭结构动特性有限元
模型检查方法**

QJ 20292—2014

*

中国航天标准化研究所出版

北京市丰台区小屯路 89 号

邮政编码：100071

中国航天标准化研究所

印务发行部印刷、发行

版权专有 不得翻印

*

2015 年 2 月出版

定价：16 元