

# 支承刚度和轴向位置对某型对转发动机 低压转子临界转速的影响

邓旺群<sup>1,2</sup>, 王毅<sup>1,2</sup>, 聂卫健<sup>1,2</sup>, 何萍<sup>1</sup>, 徐友良<sup>1,2</sup>, 杨海<sup>1,2</sup>

(1. 中国航空动力机械研究所; 2. 航空发动机振动技术航空科技重点实验室: 湖南株洲 412002)

**摘要:** 为提供某型对转发动机低压转子临界转速的设计和调整的理论依据, 开展了该转子的临界转速随支承刚度和轴向位置变化规律的研究。以该转子为研究对象, 采用有限元法建立了转子动力特性的计算模型, 基于不同的支承刚度和轴向位置, 运用转子动力学分析软件 SAMCEF/ROTOR 对低压转子的前 4 阶临界转速进行了系统的计算分析, 揭示了低压转子前 4 阶临界转速随支承刚度和轴向位置的变化规律。结果表明: 支承刚度对低压转子的临界转速有显著影响, 而支承轴向位置对临界转速的影响较小。

**关键词:** 对转发动机; 低压转子; 临界转速; 有限元法; 支承刚度; 支承轴向位置

中图分类号: V231.96

文献标识码: A

doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2016.03.002

## Influence of Supporting Stiffness and Axial Location on Critical Speeds of a Low-Pressure Rotor of a Counter Rotating Engine

DENG Wang-qun<sup>1,2</sup>, WANG Yi<sup>1,2</sup>, NIE Wei-jian<sup>1,2</sup>, HE Ping<sup>1</sup>, XU You-liang<sup>1,2</sup>, YANG Hai<sup>1,2</sup>

(1. Aviation Power-Plant Research Institute; 2. Aviation Key Laboratory of Aero-engine Vibration Technology;

Zhuzhou Hunan 412002, China)

**Abstract:** In order to provide theoretical bases for critical speeds design and adjust of a low-pressure rotor, a study on law of critical speeds with supporting stiffness and axial location was carried out. Taking the rotor as the research object, the calculation model of dynamic features was established by finite element method. The first four orders critical speeds of the rotor were systematically calculated and analyzed by SAMCEF/ROTOR software based on different supporting stiffness, and axial location and the laws were revealed. The results show that the influence of the supporting stiffness on critical speeds is significant and the influence of the supporting axial location is slight.

**Key words:** counter rotating engine; low-pressure rotor; critical speed; finite element method; supporting stiffness; supporting axial location

## 0 引言

转子动力特性是转子动力学的 1 个重要研究领域, 国内外很多学者都在该领域开展了大量的研究工作<sup>[1-8]</sup>。而随着现代中小型航空发动机转子的速度更快、柔性更高, 结构越来越复杂, 建立能反映实际情况的计算模型是进行动力特性分析的关键。在国内, 翼成等对多盘转子系统的临界转速进行了分析<sup>[9]</sup>, 邓旺群对某涡轴发动机动力涡轮转子的动力特性进行了

系统研究<sup>[10]</sup>, 缪辉则分析了双转子系统的临界转速<sup>[11]</sup>。这些研究均采用有限元方法建立计算模型。临界转速是转子动力特性研究的核心内容, 临界转速设计满足要求是转子设计的首要条件。而在转子各零部件的结构和材料确定后, 为了使临界转速满足裕度要求<sup>[12]</sup>, 选取合适的支承刚度和轴向位置就成为重要环节。此前, 白中祥、梅庆研究了支承系统的刚度、支承布置对转子动力特性的影响<sup>[13-14]</sup>。邓旺群等对某小型涡扇发动机高速柔性转子的前 3 阶临界转速随支承刚度的

收稿日期: 2015-11-21 基金项目: 航空科学基金(20112108001、2013ZB08001)资助

作者简介: 邓旺群(1967), 男, 博士, 自然科学研究员, 主要从事航空发动机强度试验和转子动力学研究工作; E-mail: hnzzdwq@163.com。

引用格式: 邓旺群, 王毅, 聂卫健, 等. 支承刚度和轴向位置对某型对转发动机低压转子临界转速的影响 [J]. 航空发动机, 2016, 42 (3): 7-11. DENG Wangqun, WANG Yi, NIE Weijian, et al. Influence of supporting stiffness and axial location on critical speeds of a low-pressure rotor of a counter rotating engine[J]. Aeroengine, 2016, 42(3): 7-11.

变化规律进行了分析<sup>[15]</sup>。

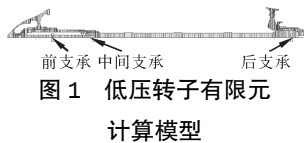
本文针对某型对转发动机低压转子前 4 阶临界转速（该转子是 1 个带细长柔性轴的高速柔性转子，其各阶临界转速均为弯曲临界转速）随支承刚度和轴向位置的变化规律进行了系统研究，为低压转子临界转速设计和调整提供参考。

1 有限元计算模型

低压转子结构十分复杂，主要零部件有：进气罩、风扇叶片盘、风扇轴、拉紧螺杆、低压轴和低压涡轮叶片盘。低压转子各支承的基准支承刚度值通过计算确定，见表 1。

| 表 1 支承刚度       |     |      |     |
|----------------|-----|------|-----|
| 支承             | 前支承 | 中间支承 | 后支承 |
| 支承刚度/(E+7 N/m) | 0.5 | 5.0  | 0.5 |

采用梁单元建立低压转子的动力特性有限元计算模型。建模时，将轮盘叶片和支承部分分别用集中质量单元和轴承单元模拟。通过转子全转速范围内的动力特性试验验证了计算模型的正确性，有限元计算模型如图 1 所示。



2 支承刚度对低压转子临界转速的影响分析

通过计算，揭示了低压转子前 4 阶临界转速随各支承刚度的变化规律。计算时，以表 1 中的支承刚度为基准。

2.1 前支承刚度对低压转子临界转速的影响

当中间支承和后支承刚度一定、前支承刚度在  $(0.3\sim 50)E+7\text{ N/m}$  范围内变化时，低压转子前 4 阶临界转速的计算结果见表 2，其随前支承刚度的变化曲线如图 2 所示。

由表 2、图 2 得到的低压转子前 4 阶临界转速随前支承刚度变化的变化率见表 3。

由表 2、3 和图 2 可知：

(1)前支承刚度从  $3E+6\text{ N/m}$  增大到  $5E+7\text{ N/m}$ ，低压转子的第 1 阶临界转速增大  $2321\text{ r/min}$ ，增大了

表 2 转子前 4 阶临界转速随前支承刚度变化的计算结果

| 前支承刚度/<br>(E+7 N/m) | 临界转速/(r/min) |       |       |       |
|---------------------|--------------|-------|-------|-------|
|                     | 第 1 阶        | 第 2 阶 | 第 3 阶 | 第 4 阶 |
| 0.3                 | 5918         | 8901  | 20534 | 55625 |
| 0.5                 | 6857         | 9211  | 20566 | 55633 |
| 1                   | 7818         | 10652 | 20664 | 55654 |
| 3                   | 8195         | 15916 | 21424 | 55739 |
| 5                   | 8239         | 18274 | 23287 | 55830 |
| 7                   | 8256         | 19032 | 25826 | 55926 |
| 10                  | 8268         | 19396 | 29396 | 56083 |
| 15                  | 8277         | 19590 | 34170 | 56381 |
| 30                  | 8285         | 19732 | 43278 | 57687 |
| 50                  | 8289         | 19778 | 49479 | 61221 |

表 3 前 4 阶临界转速随前支承刚度变化的变化率

| 前支承刚度/<br>(E+7 N/m) | 临界转速变化率/% |        |       |       |
|---------------------|-----------|--------|-------|-------|
|                     | 第 1 阶     | 第 2 阶  | 第 3 阶 | 第 4 阶 |
| 0.3~5               | 39.22     | 105.30 | 13.41 | 0.37  |
| 5~15                | 0.46      | 7.20   | 46.73 | 0.99  |
| 15~50               | 0.15      | 0.96   | 44.80 | 8.58  |

39.22%；第 2 阶临界转速增大  $9373\text{ r/min}$ ，增大幅度达 105.30%；第 3 阶临界转速增大  $2753\text{ r/min}$ ，增大了 13.41%；第 4 阶临界转速几乎没有变化。

(2)前支承刚度从  $5E+7\text{ N/m}$  增大到  $1.5E+8\text{ N/m}$ ，低压转子第 2 阶临界转速有一定变化，第 3 阶临界转速有显著变化，分别增大了 7.20%和 46.73%，其他 2 阶临界转速几乎没有变化。

(3)前支承刚度从  $1.5E+8\text{ N/m}$  增大到  $5E+8\text{ N/m}$ ，低压转子前 2 阶临界转速几乎没有变化，第 3 阶临界转速增大  $15309\text{ r/min}$ ，增大了 44.80%，第 4 阶临界转速有一定变化，但仅增大 8.58%。

2.2 中间支承刚度对低压转子临界转速的影响

当前、后支承刚度一定，中间支承刚度在  $(0.3\sim 50)E+7\text{ N/m}$  范围内变化时，低压转子前 4 阶临界转速随中间支承刚度的变化曲线如图 3 所示，其计算结果见表 4。

由图 3、表 4 得到的低压转子前 4 阶临界转速随中间支承刚度变化的变化率见表 5。

由表 4、5 和图 3 可知：

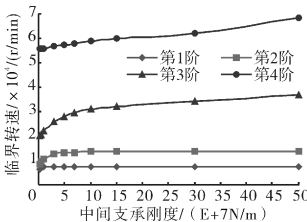


图 3 前 4 阶临界转速随中间支承刚度的变化曲线

| 表 4 转子前 4 阶临界转速随中间支承刚度变化的计算结果 |               |       |       |       |
|-------------------------------|---------------|-------|-------|-------|
| 中间支承刚度 /<br>(E+7 N/m)         | 临界转速 /(r/min) |       |       |       |
|                               | 第 1 阶         | 第 2 阶 | 第 3 阶 | 第 4 阶 |
| 0.3                           | 6310          | 8353  | 19979 | 55546 |
| 0.5                           | 6857          | 9211  | 20566 | 55633 |
| 1                             | 7126          | 10770 | 21934 | 55847 |
| 3                             | 7238          | 12629 | 25754 | 56634 |
| 5                             | 7256          | 13096 | 27962 | 57327 |
| 7                             | 7263          | 13303 | 29411 | 57941 |
| 10                            | 7268          | 13461 | 30856 | 58740 |
| 15                            | 7272          | 13584 | 32312 | 59822 |
| 30                            | 7276          | 13708 | 34217 | 61950 |
| 50                            | 7278          | 13807 | 36797 | 68285 |

| 表 5 前 4 阶临界转速随中间支承刚度变化的变化率 |            |       |       |       |
|----------------------------|------------|-------|-------|-------|
| 中间支承刚度范围 /<br>(E+7 N/m)    | 临界转速变化率 /% |       |       |       |
|                            | 第 1 阶      | 第 2 阶 | 第 3 阶 | 第 4 阶 |
| 0.3~5                      | 14.99      | 56.78 | 39.96 | 3.21  |
| 5~15                       | 0.22       | 3.73  | 15.56 | 4.35  |
| 15~50                      | 0.08       | 1.64  | 13.88 | 14.15 |

(1) 中间支承刚度从 3E+6 N/m 增大到 5 E+7 N/m, 低压转子第 1 阶临界转速增大 946 r/min, 缓慢增大了 14.99%; 第 2 阶临界转速增大 4743 r/min, 增大了 56.78%; 第 3 阶临界转速增大 7983 r/min, 增大了 39.96%; 第 4 阶临界转速没有实质性变化(变化率小于 5%)。

(2) 中间支承刚度从 5E+7 N/m 增大到 1.5 E+8 N/m, 低压转子第 3 阶临界转速有一定变化, 增大了 15.56%, 其他 3 阶临界转速均没有实质性变化(变化率均小于 5%)。

(3) 中间支承刚度从 1.5E+8 N/m 增大到 5 E+8 N/m, 低压转子前 2 阶临界转速均没有实质性变化(变化率均小于 5%), 第 3、4 阶临界转速均有一定变化, 分别增大了 13.88%和 14.15%。

2.3 后支承刚度对低压转子临界转速的影响

当前支承和中间支承刚度一定, 后支承刚度在 (0.3~50)E+7 N/m 范围内变化时, 低压转子前 4 阶临界转速随后支承刚度的变化曲线分别如图 4 所示, 其计算结果见表 6。

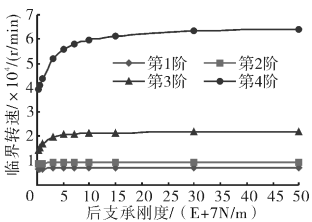


图 4 前 4 阶临界转速随后支承刚度的变化曲线

由图 4、表 6 得到的低压转子前 4 阶临界转速随后支承刚度变化的变化率见表 7。

| 表 6 转子前 4 阶临界转速随后支承刚度变化的计算结果 |               |       |       |       |
|------------------------------|---------------|-------|-------|-------|
| 后支承刚度 /<br>(E+7 N/m)         | 临界转速 /(r/min) |       |       |       |
|                              | 第 1 阶         | 第 2 阶 | 第 3 阶 | 第 4 阶 |
| 0.3                          | 6539          | 8527  | 13970 | 39513 |
| 0.5                          | 6665          | 8749  | 15125 | 40891 |
| 1                            | 6770          | 8981  | 17049 | 43945 |
| 3                            | 6842          | 9171  | 19757 | 51716 |
| 5                            | 6857          | 9211  | 20567 | 55633 |
| 7                            | 6863          | 9229  | 20949 | 57885 |
| 10                           | 6867          | 9243  | 21251 | 59836 |
| 15                           | 6871          | 9253  | 21495 | 61486 |
| 30                           | 6874          | 9264  | 21746 | 63191 |
| 50                           | 6876          | 9268  | 21849 | 63872 |

| 表 7 前 4 阶临界转速随后支承刚度变化的变化率 |            |       |       |       |
|---------------------------|------------|-------|-------|-------|
| 后支承刚度 /<br>(E+7 N/m)      | 临界转速变化率 /% |       |       |       |
|                           | 第 1 阶      | 第 2 阶 | 第 3 阶 | 第 4 阶 |
| 0.3~5                     | 4.86       | 8.02  | 47.22 | 40.80 |
| 5~15                      | 0.20       | 0.46  | 4.51  | 10.52 |
| 15~50                     | 0.07       | 0.16  | 1.65  | 3.88  |

由表 6、7 和图 4 可知:

(1) 后支承刚度从 3E+6 N/m 增大到 5E+7 N/m, 低压转子第 1 阶临界转速没有实质性变化(变化率小于 5%); 第 2 阶临界转速有一定变化, 仅增大了 8.02%; 第 3 阶临界转速增大 6597 r/min, 增大了 47.22%; 第 4 阶临界转速增大 16120 r/min, 增大了 40.80%。

(2) 后支承刚度从 5E+7 N/m 增大到 1.5 E+8 N/m, 低压转子前 3 阶临界转速均没有实质性变化(变化率均小于 5%), 第 4 阶临界转速有一定的变化, 增大了 10.52%。

(3) 后支承刚度从 1.5E+8 N/m 增大到 5 E+8 N/m, 低压转子前 4 阶临界转速均没有实质性变化(变化率均小于 5%)。

3 支承轴向位置对低压转子临界转速的影响

以表 1 中的支承刚度为计算支承刚度, 以有限元模型中的各支承轴向位置为初始位置, 通过计算, 分析各支承的轴向位置对低压转子前 4 阶临界转速的影响。

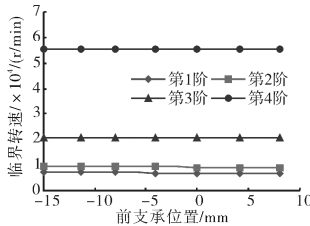
3.1 前支承轴向位置对低压转子临界转速的影响

当中间支承和后支承的轴向位置一定、前支承轴向位置在一定范围内变化时,低压转子前 4 阶临界转速的计算结果见表 8,其随前支承轴向位置的变化曲线如图 5 所示。图中,横坐标“0”表示初始位置,横坐标为负值表示支承轴向位置前移,横坐标为正值表示支承轴向位置后移,下同。

表 8 转子前 4 阶临界转速随前支承轴向位置变化的计算结果

| 前支承<br>轴向位置 | 临界转速/(r/min) |       |       |       |
|-------------|--------------|-------|-------|-------|
|             | 第 1 阶        | 第 2 阶 | 第 3 阶 | 第 4 阶 |
| 前移 15.0 mm  | 7315         | 9542  | 20572 | 55620 |
| 前移 11.4 mm  | 7216         | 9449  | 20571 | 55622 |
| 前移 8.0 mm   | 7120         | 9372  | 20569 | 55625 |
| 前移 4.1 mm   | 6995         | 9289  | 20568 | 55629 |
| 初始位置        | 6857         | 9211  | 20566 | 55633 |
| 后移 4.1 mm   | 6711         | 9144  | 20565 | 55638 |
| 后移 8.0 mm   | 6565         | 9087  | 20563 | 55644 |

由表 8、图 5 得到的低压转子前 4 阶临界转速随前支承轴向位置变化的变化率见表 9。



由表 8、9 和图 5 可知：前支承轴向位置从初始位置前移 15 mm，低压转子前 2 阶临界转速分别增大了 6.68%和 3.59%，而第 3、4 阶临界转速几乎没有变化；前支承轴向位置从初始位置后移 8 mm，低压转子前 4 阶临界转速均没有实质性变化(变化率均小于 5%)。

表 9 前 4 阶临界转速随前支承轴向位置变化的变化率

| 前支承轴向位置  | 临界转速变化率/% |       |       |       |
|----------|-----------|-------|-------|-------|
|          | 第 1 阶     | 第 2 阶 | 第 3 阶 | 第 4 阶 |
| 前移 15 mm | 6.68      | 3.59  | 0.03  | 0.02  |
| 后移 8 mm  | 4.26      | 1.35  | 0.01  | 0.02  |

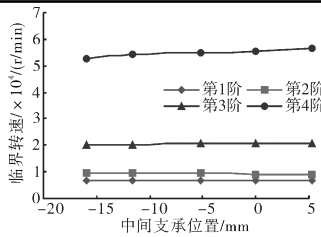
3.2 中间支承轴向位置对低压转子临界转速的影响

当前、后支承的轴向位置一定,中间支承轴向位置在一定范围内变化时,低压转子前 4 阶临界转速的计算结果见表 10,其随中间支承位置的变化曲线如图 6 所示。

表 10 转子前 4 阶临界转速随中间支承轴向位置变化的计算结果

| 中间支承轴向<br>位置 | 临界转速/(r/min) |       |       |       |
|--------------|--------------|-------|-------|-------|
|              | 第 1 阶        | 第 2 阶 | 第 3 阶 | 第 4 阶 |
| 前移 15.9 mm   | 6661         | 9414  | 20216 | 52917 |
| 前移 11.6 mm   | 6743         | 9325  | 20355 | 54045 |
| 前移 5.2 mm    | 6796         | 9272  | 20466 | 54865 |
| 初始位置         | 6857         | 9211  | 20566 | 55633 |
| 后移 5.2 mm    | 6915         | 9156  | 20679 | 56451 |

由表 10、图 6 得到的低压转子前 4 阶临界转速随中间支承轴向位置的变化率见表 11。



从表 10、11 和图 6 可知：不论中间支承轴向位置从初始位置前移 15.9 mm 还是后移 5.2 mm，低压转子前 4 阶临界转速均没有实质性变化(变化率均小于 5%)。

表 11 前 4 阶临界转速随中间支承轴向位置变化的变化率

| 前支承轴向位置    | 临界转速变化率/% |       |       |       |
|------------|-----------|-------|-------|-------|
|            | 第 1 阶     | 第 2 阶 | 第 3 阶 | 第 4 阶 |
| 前移 15.9 mm | 2.86      | 2.20  | 1.70  | 4.88  |
| 后移 5.2 mm  | 0.85      | 0.60  | 0.55  | 1.47  |

表 12 改变后支承轴向位置转子前 4 阶临界转速计算结果

| 后支承轴<br>向位置 | 临界转速/(r/min) |       |       |       |
|-------------|--------------|-------|-------|-------|
|             | 第 1 阶        | 第 2 阶 | 第 3 阶 | 第 4 阶 |
| 前移 13.5 mm  | 7083         | 9337  | 20060 | 55543 |
| 前移 5.9 mm   | 6980         | 9285  | 20299 | 55583 |
| 初始位置        | 6857         | 9211  | 20566 | 55633 |
| 后移 5.9 mm   | 6746         | 9143  | 20783 | 55678 |
| 后移 9.7 mm   | 6672         | 9099  | 20920 | 55709 |
| 后移 18.7 mm  | 6491         | 9002  | 21234 | 55787 |

3.3 后支承轴向位置对低压转子临界转速的影响

当前支承和中间支承的轴向位置一定,后支承轴向位置在一定范围内变化时,低压转子前 4 阶临界转速的计算结果见表 12,其随后支承轴向位置的变化曲线如图 7 所示。

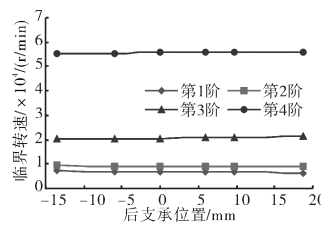


图 7 前 4 阶临界转速随后支承轴向位置的变化曲线

由表 12、图 7 得到的低压转子前 4 阶临界转速随后支承轴向位置变化的变化率见表 13。

表 13 前 4 阶临界转速随后支承轴向位置变化的变化率

| 后支承轴向位置    | 临界转速变化率/% |       |       |       |
|------------|-----------|-------|-------|-------|
|            | 第 1 阶     | 第 2 阶 | 第 3 阶 | 第 4 阶 |
| 前移 13.5 mm | 3.30      | 1.37  | 2.46  | 0.16  |
| 后移 18.7 mm | 5.34      | 2.27  | 3.25  | 0.28  |

从表 12、13 和图 7 可知:后支承轴向位置从初始位置前移 13.5 mm, 低压转子的前 4 阶临界转速没有实质性变化(变化率均小于 5%);后支承轴向位置从初始位置后移 18.7 mm, 低压转子的第 1 阶临界转速减小了 5.34%, 其他 3 阶临界转速没有实质性变化(变化率均小于 5%)。

#### 4 结论

针对某对转发动机低压转子前 4 阶临界转速随支承刚度和轴向位置的变化规律进行了系统的计算分析, 主要结论如下:

(1) 支承刚度对低压转子前 4 阶临界转速有显著影响, 支承轴向位置的影响较小, 如需调整低压转子临界转速, 优先选取调整支承刚度的方法。

(2) 如需调整低压转子的第 1 阶临界转速, 前支承刚度和中间支承刚度在  $(3 \text{ E}+6 \sim 5 \text{ E}+7) \text{ N/m}$  范围内, 可以通过调整前支承或中间支承刚度来实现。

(3) 如需调整低压转子的第 2 阶临界转速, 前、中、后支承刚度在  $(3 \text{ E}+6 \sim 5 \text{ E}+7) \text{ N/m}$  范围内, 可以通过调整前、中、后支承刚度来实现。

(4) 如需调整低压转子的第 3 阶临界转速, 前支承和中间支承刚度在  $(3 \text{ E}+6 \sim 5 \text{ E}+8) \text{ N/m}$  范围内、后支承刚度在  $(3 \text{ E}+6 \sim 5 \text{ E}+7) \text{ N/m}$  范围内, 可以通过调整前、中、后支承刚度来实现。

(5) 如需调整低压转子的第 4 阶临界转速, 前支承和中间支承刚度在  $(1.5 \text{ E}+8 \sim 5 \text{ E}+8) \text{ N/m}$  范围内、后支承刚度在  $(3 \text{ E}+6 \sim 1.5 \text{ E}+8) \text{ N/m}$  范围内, 可以通过调整前、中、后支承刚度来实现。

#### 参考文献:

- [1] Chiang H W D, Hsu C N, Tu S H. Rotor-bearing analysis for turbo machinery single and dual rotor systems [J]. Journal of Propulsion and Power, 2004, 20(6): 1096-1104.
- [2] Dokainish M A. A new approach for plate vibration :combination of transfer matrix and finite element technique [J]. Journal of Engineering for Industry, Trans. ASME, 1972, 94(2): 526-530.
- [3] Lund J W. Stability and damped critical speeds of a flexible rotor in fluid film bearings [J]. Journal of Engineering for Industry, Trans.

ASME, 1974, 96(3): 509-517.

- [4] Gupta K D, Gupta K, Athre K. Unbalance response of a dual rotor system: theory and experiment [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1993, 115: 427-435.
- [5] Samantaray A K, Mukherjee A, Bhattacharyya R. Some studies on rotors with polynomial type non-linear external and internal damping [J]. International Journal of Non-linear Mechanics, 2006, 41: 1007-1015.
- [6] 洪杰, 王华, 肖大为, 等. 转子支承刚度对转子动力特性的影响分析[J]. 航空发动机, 2008, 34(1): 23-27.  
HONG Jie, WANG Hua, XIAO Dawei, et al. Effects of dynamic stiffness of rotor bearing on rotor dynamic characteristics [J]. Aeroengine, 2008, 34(1): 23-27. (in Chinese)
- [7] 莫延斌, 李全通, 张斌, 等. 某型航空发动机双转子系统动力学特性计算[J]. 机械设计与制造, 2011(7): 117-119.  
MO Yanyu, LI Quantong, ZHANG Bin, et al. Dynamic characteristic calculation of a engine's double rotors system [J]. Machinery Design & Manufacture, 2011(7): 117-119. (in Chinese)
- [8] 华军, 许庆余, 张家忠. 挤压油膜阻尼器—滑动轴承—转子系统非线性动力特性的数值分析及试验研究 [J]. 航空学报, 2001, 22(1): 42-45.  
HUA Jun, XU Qingyu, ZHANG Jiazhong. Numerical and experimental study on nonlinear dynamic behavior of the fluid bearing-rotor system with squeeze film damper [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2001, 22(1): 42-45. (in Chinese)
- [9] 翼成, 杨兆建, 宋高峰, 等. 多轮盘转子系统临界转速的计算方法分析[J]. 机械设计与制造, 2012(12): 28-30.  
YI Cheng, YANG Zhaojian, SONG Gaofeng, et al. Calculation method analysis of many roulette rotor system critical speed [J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(12): 28-30. (in Chinese)
- [10] 邓旺群, 郭飞跃, 高德平. 航空发动机高速柔性转子动力特性计算 [J]. 振动与冲击, 2006, 25(5): 130-133.  
DENG Wangqun, GUO Feiyue, GAO Deping. Dynamic characteristics calculation of high speed flexible rotor of aeroengine [J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(5): 130-133. (in Chinese)
- [11] 缪辉, 王克明, 艾书民, 等. 双转子系统临界转速的有限元分析[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2011, 28(5): 27-31.  
MIAO Hui, WANG Keming, AI Shumin, et al. Finite element analysis on critical speeds of a dual-rotor system [J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2011, 28(5): 27-31. (in Chinese)
- [12] 付才高, 郑大平, 欧园霞, 等. 转子动力学及整机振动(航空发动机设计手册第 19 册)[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000: 8-24.  
FU Caigao, ZHENG Daping, OU Yuanxia, et al. Rotor dynamics and whole engine vibration (No.19 volume of aeroengine design manual) [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2000: 8-24. (in Chinese)
- [13] 白中祥, 吴伟亮, 刘闯. 支承系统的刚度对转子动力特性的影响 [J]. 机械设计与研究, 2012, 28(4): 18-21.  
BAI Zhongxiang, WU Weiliang, LIU Hongzhao. The effect of the stiffness of a rotor's supporting system on its dynamic characteristics [J]. Machine Design and Research, 2012, 28(4): 18-21. (in Chinese)
- [14] 梅庆, 欧园霞. 支承布置对双支承转子动力特性的影响[J]. 振动工程学报, 2004, 17(S1): 156-158.  
MEI Qing, OU Yuanxia. Effects of supporting distribution on dynamic characteristics of a rotor with double bearing [J]. Journal of Vibration Engineering, 2004, 17(S1): 156-158. (in Chinese)
- [15] 邓旺群, 聂卫健, 何萍, 等. 高速柔性转子临界转速随支承刚度的变化规律[J]. 噪声与振动控制, 2015, 35(3): 98-101.  
DENG Wangqun, NIE Weijian, HE Ping, et al. Change laws of critical speeds with supporting stiffness of a high-speed flexible rotor [J]. Noise and Vibration Control, 2015, 35(3): 98-101. (in Chinese)

(编辑: 栗枢)