

连接轴截面形状对航空发动机临界转速影响研究

朱银方^{1,2} 钟团结¹ 劳贤豪^{1,2} 黎琨¹

(1 中国航发湖南动力机械研究所 湖南 株洲 412002;
2 中小型航空发动机叶轮机械湖南省重点实验室 湖南 株洲 412002)

摘要: 临界转速设计作为航空发动机转子系统设计的一个重要内容,而在开展航空发动机转子系统设计时,通常会遇到临界转速裕度不足而需要优化的情况,解决措施不外乎调整转子支承刚度、支承布局、转子系统的质量分布等,上述解决措施各有优缺点。本文提出了一种调整航空发动机临界转速的方法——改变转子连接轴的截面形状,实现对转子质量分布、刚度分布的改变。文章以某型发动机压气机转子为例,分析了连接轴截面形状对转子临界转速、不平衡响应、强度等方面的影响,发现连接轴截面形状在一定范围内改变对转子的不平衡响应、强度裕度的影响可以忽略,但对转子的临界转速有一定的影响。因此,在临界转速裕度距离设计要求不大的情况下,可以考虑采用改变转子连接轴的截面形状来调节临界转速。

关键词: 航空发动机; 截面形状; 临界转速; 不平衡响应; 变化规律

0 引言

中小型航空发动机转子叶片与机匣的径向间隙比大型发动机小得多,但相对间隙却比大发动机大得多。中小型航空发动机转速高、径向间隙小,要求转子的挠度和振幅小,给转子轴系和转子动力学带来新的问题和困难,直接关系发动机研制的成败。某型组合压气机在研制过程中,就曾因临界转速问题导致振动超限^[1]。航空发动机转子的动力学特性直接关系到发动机的运行安全和稳定,而临界转速作为动力学特性的一部分,因此,对其开展深入研究意义重大。从转子系统的结构特点以及运动方程组成来看,临界转速的影响因子主要包括转子质量、转子自身刚度、支承形式以及刚度^[2]。国内外学者对此展开了分析研究:白中祥等^[3]、洪杰等^[4]研究了转子的支承刚度对转子动力学特性的影响;李海伟^[5]分析了支承刚度、阻尼对转子临

界转速的影响;邓旺群等^[6]分析了不同支承刚度对某涡扇发动机低压转子临界转速的影响。本文研究分析了不同截面形状的连接轴对压气机转子临界转速、不平衡响应、强度和刚度的变化规律,提出了改变连接轴截面形状以调节临界转速。

1 转子结构简介

某型发动机转子采用1-1-1的支承方式,如图1所示。连接轴主要用于连接压气机转子和涡轮转子,将涡轮产生的功率传递给压气机。为了研究连接轴截面形状对转子临界转速、连接轴自身强度、刚度的影响,保持连接轴与压气机、涡轮转子的连接界面不变、连接轴的长度 L 、 L_1 不变、连接轴的最大厚度 b 不变,只改变连接轴中间一端的形状即改变 α 、 b_1 ,即设计成类似拉瓦尔喷管形状,如图2所示。连接轴截面控制尺寸见表1。

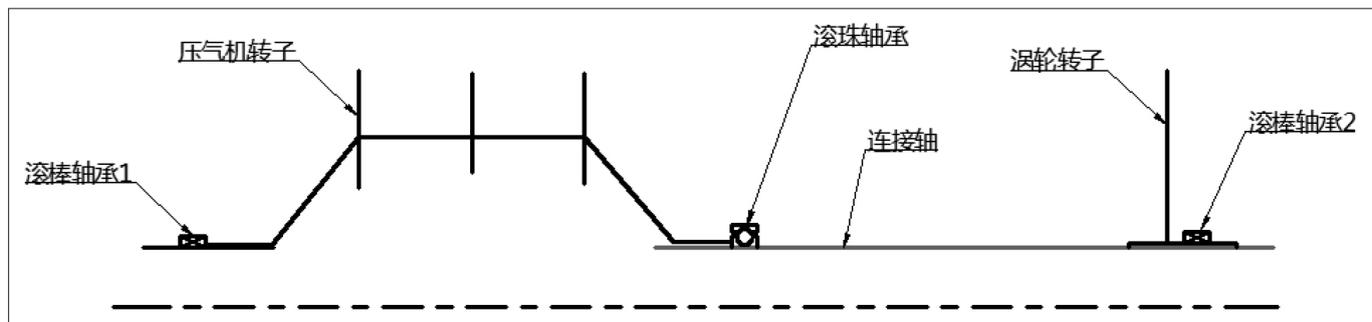


图1 某型发动机转子结构示意图

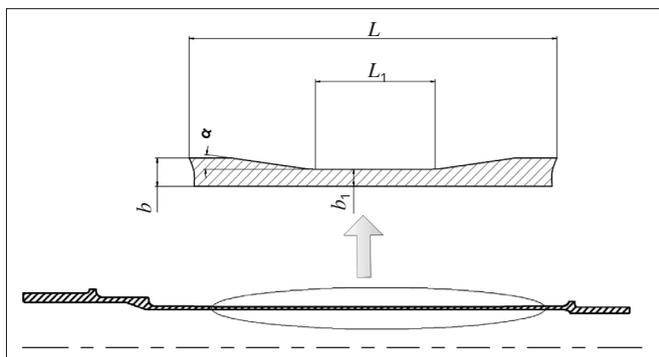


图2 连接轴截面形状示意图

2 截面形状对临界转速影响研究

2.1 计算模型

为了保证理论分析更加准确,在进行航空发动机临界转速计算时,一定要根据转子的真实情况建立计算模型。对于本文所要研究的转子系统来说,传统的传递矩阵法已经不再适用。目前,为了使计算模型更加准确和完整,转子建模通常采用有限元法。为了满足其他功能的需要,实际的航空发动机转子结构上会存在一些孔、倒角等结构,在采用有限元计算软件建立该转子的分析模型时,对上述局部结构进行简化处理。另外还将压气机转子和涡轮转子结构简化为5个集中质量单元加到转子模型上;采用3个轴承单元模拟转子支承。

2.2 计算分析

在支点刚度不变的情况下,采用SAMCEF软件对具有不同截面形状的转子进行临界转速计算,计算结果如表2所示。

表1 连接轴截面控制尺寸

编号	最大厚度 b/mm	最小厚度 b_1/mm	扩张角 $\alpha/(\text{°})$
结构1	3	3	0
结构2	3	2	1.2
结构3	3	2	2
结构4	3	2	2.5

表2 转子临界转速计算结果

编号	1阶临界转速 / (r/min)	2阶临界转速 / (r/min)	3阶临界转速 / (r/min)
结构1	2167.1	15030.4	36539.7
结构2	2036.7	14978.4	37910.0
结构3	2016.2	14966.4	37877.4
结构4	2007.5	14903.5	38123.4

转子前3阶临界转速随扩张角变化规律如图3~图5所示。

综合分析图3~图5,可以看出:

- (1) 扩张角即截面形状对临界转速有一定的影响;
- (2) 第1~3阶临界转速随扩张角的变化趋势不一致;
- (3) 第1阶、第2阶临界转速随扩张角增加而减小,但第1阶临界转速变化曲线的斜率先增大后减小,第2阶临界转速变化曲线斜率先减小后增大;
- (4) 第3阶临界转速随扩张角增加而减小。

3 截面形状对不平衡响应影响研究

为了便于对转子进行不平衡响应计算,按照转子的结构从左至右的顺序依次选取8个位置(1#~8#),在给定不平衡量载荷前提下,通过这8个位置的位移响应给出转子过临界转速时的位移响应曲线。转子平衡组件在进行装配后,通过安装配重块和铆钉进行转子动平衡,选取动平衡位置同相位施加最大允许不平衡量 $12.7\text{g}\cdot\text{mm}$ 。

结构1~结构4转子过1阶、2阶临界转速时位移响应曲线分别见图6和图7。

从上述计算结果可得出如下结论:

- (1) 转子响应曲线与转子振型图基本一致;
- (2) 在给定支承刚度和不平衡载荷作用下,结构1和机构2转子位移不平衡响应绝对值均较小;
- (3) 不同阶次的不同结构之间,响应存在一定的差异,阶次最大差异为10.6%,二阶最大差异为18.6%。

4 截面形状对强度影响研究

4.1 计算模型

在划分网格的时候考虑结构的差异,控制中间段部位的网格密度,尽量消除网格差异对计算结构的影响,采用二十节点六面体单元对两种结构进行网格划分。计算采用Workbench进行有限元计算分析。

4.2 计算分析

在连接轴材料和所承受的载荷不变的情况下,主要考虑了气动轴向力、气动转矩、温度载荷、离心载荷以及惯性载荷,计算采用Workbench进行有限元计算分析,计算结果如表3所示,从中可以看出连接轴

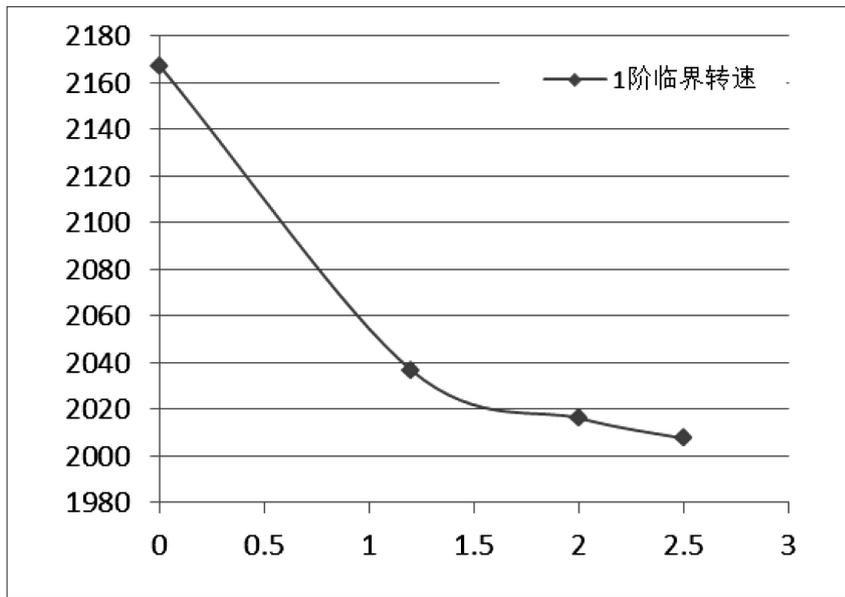


图3 1阶临界转速随 α 变化规律

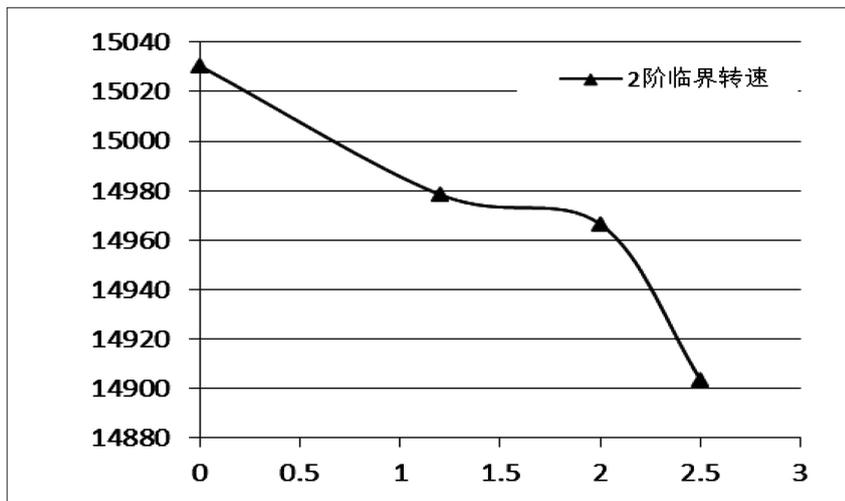


图4 2阶临界转速随 α 变化规律

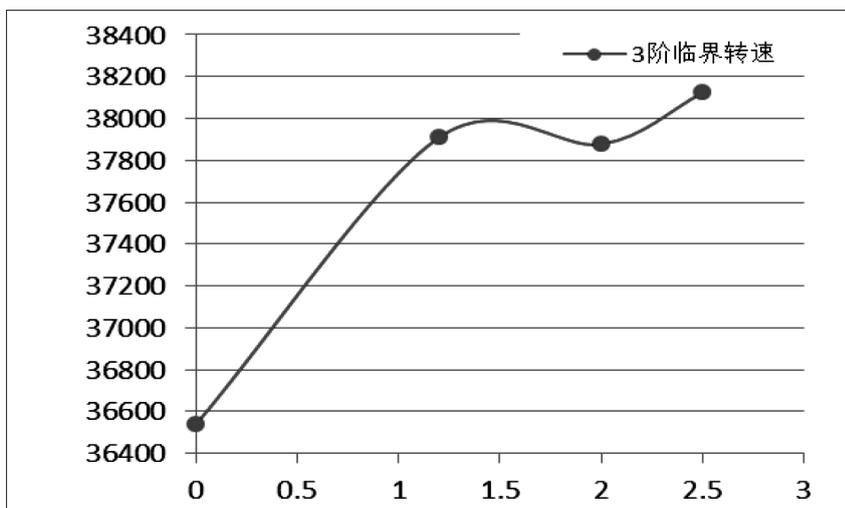


图5 3阶临界转速随 α 变化规律

的最大当量应力没有变化。

连接轴最大综合位移、 L_1 位置最大当量应力随扩张角的变化曲线如图8~图9所示。

从图中可以看出：

(1) 最大综合位移随扩张角增大而减小，基本呈线性变化，但变化量较小；

(2) L_1 位置最大当量应力随扩张角增大而减小，最大增加了4.9%，但强度裕度依然满足要求。

5 结语

本文研究了某发动机连接轴截面形状对转子临界转速、不平衡响应、强度等方面的影响，主要结论如下：

(1) 转子1~3阶临界转速随连接轴截面形状，即扩张角 α 变化而变化，第1~2阶增加，第3阶降低。因此，可以通过改变连接轴的截面形状来调节转子的临界转速，这样做不仅成本低、效率高，还可以降低连接轴的质量。

(2) 转子的不平衡响应随扩张角 α 的增加而降低，虽然相对变化量接近20%，但是由于绝对量值均小于0.01mm，因此，该影响可以忽略不计。

(3) 连接轴截面形状的改变对其最大综合位移、最大当应力基本无影响，对拉瓦尔喷灌段的最大应力影响较小。

参考文献：

- [1] 陈国智, 蒋仕林, 高德平. 解决某型高速组合压气机临界转速问题[J]. 航空动力学报, 1994, 9(2): 179-182.
- [2] 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: 8-23.
- [3] 白中祥, 吴伟亮. 转子支承系统的刚度对其临界转速的影响[J]. 机电设备, 2012, 29(5): 46-49.
- [4] 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

表3 连接轴强度计算结果

编号	最大当量应力 /MPa	最大综合位移 /mm	L_1 位置最大当量应力 /MPa
结构1	308	1.96	241
结构2	308	1.87	253
结构3	308	1.83	261
结构4	308	1.81	272

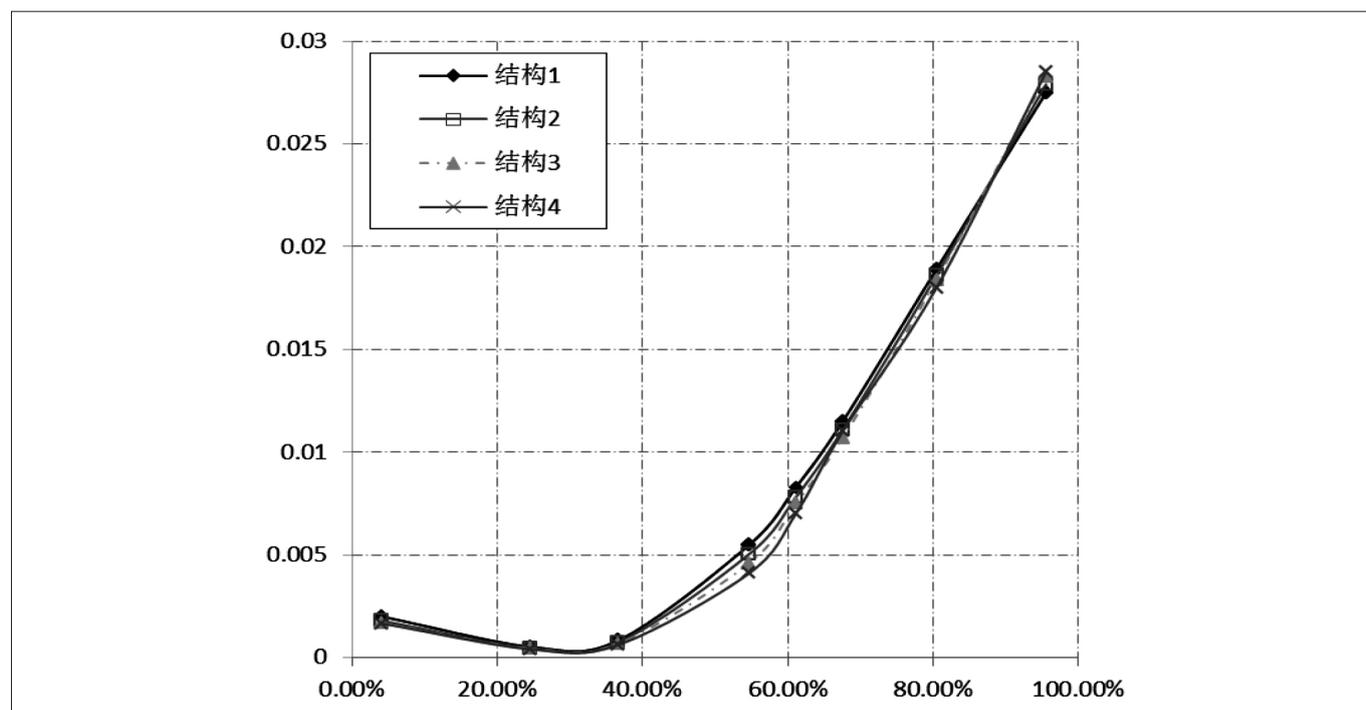


图6 转子过1阶临界转速时的响应曲线

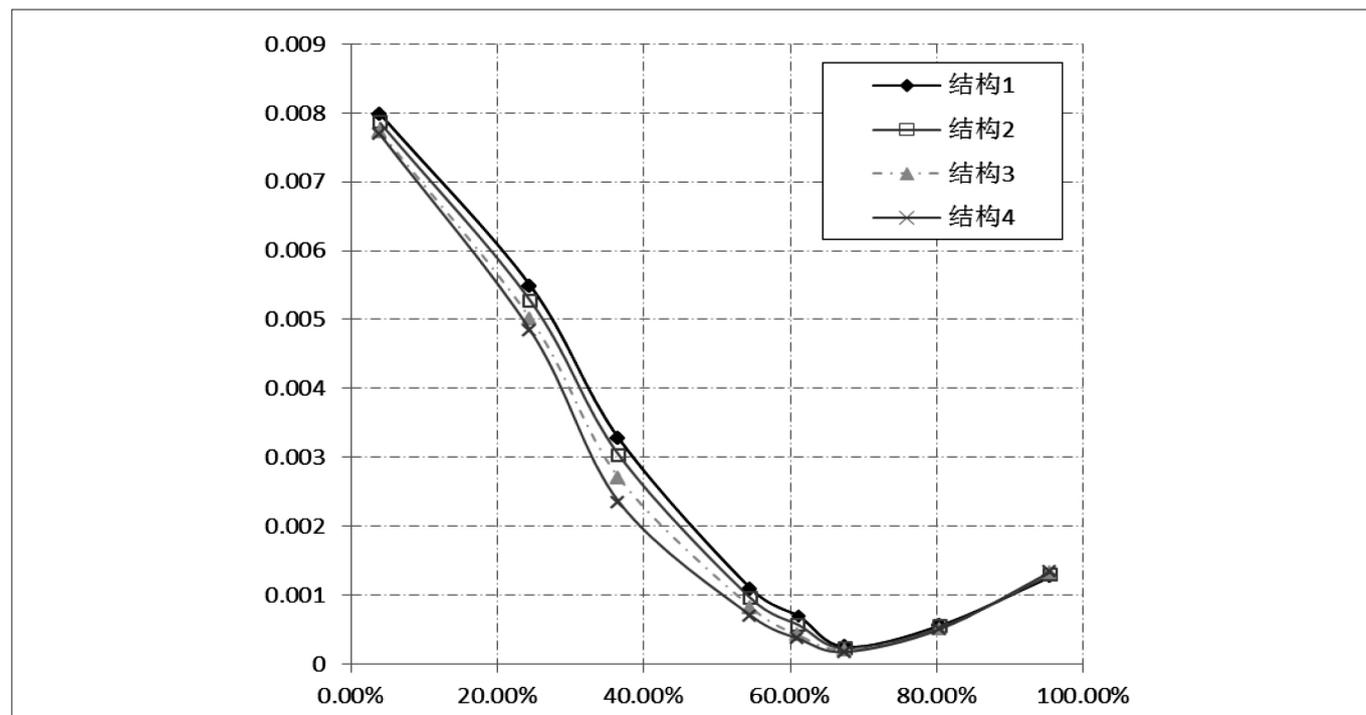


图7 转子过2阶临界转速时的响应曲线

(下转第24页)

加工效率高、加工精度高等优点。同时设计了工序3的数控铣床专用夹具, 夹具定位可靠、结构简单、操作安全方便、夹紧效率高。车床拨叉零件数控加工工艺规程与数控铣床专用夹具, 保证零件的加工精度达到图纸的要求, 同时具有较好的加工经济性。

参考文献:

[1] 邹胜林, 李玮. CA6140 车床拨叉镗孔夹具的设计 [J]. 林业机械与木工设备, 2015, 43(10):25-27.

[2] 魏金. 圆盘类零件的专用铣床夹具设计 [J]. 南方农机, 2021(20):125-127.

[3] 邹德东, 孙智文, 张高辉, 等. 齿轮泵泵体加工工艺与专用夹具设计 [J]. 内燃机与配件, 2021(4):72-74.

[4] 张久雷. 叶轮泵室的数控加工工艺与夹具设计 [J]. 机械工程师, 2021(3):116-118.

[5] 张耀宸. 机械加工工艺设计手册 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1987.

作者简介: 黄诚 (1967.04-), 男, 壮族, 广西百色人, 本科, 副教授, 研究方向: 机械设计与制造。

(上接第 19 页)

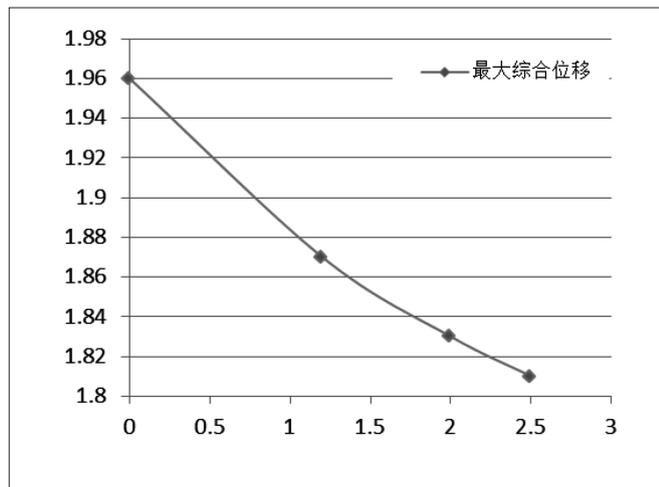


图8 连接轴最大综合位移随 α 变化曲线

机, 2008, 34(1):23-27.

[5] 李海伟. 支承参数对转子临界转速的影响分析 [J]. 上海电气技术, 2014, 7(1):48-52.

[6] 邓旺群, 聂卫健, 何萍, 等. 高速柔性转子临界转速随支

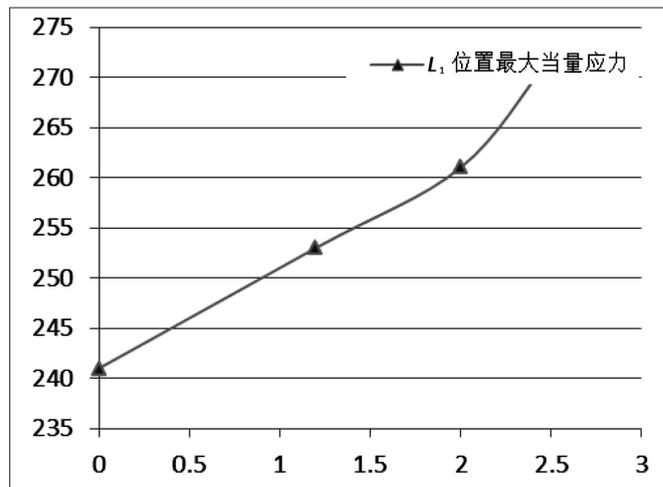


图9 连接轴 L_1 位置最大当量应力随 α 变化曲线

承刚度的变化规律 [J]. 噪声与振动控制, 2015, 35(3):98-101.

作者简介: 朱银方 (1984.08-), 男, 汉族, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 航空发动机压气机设计。