

端齿连接及变轴力的影响

株洲航空动力机械研究所 尹泽勇* * 欧园霞 胡柏安 李彦

【摘要】 针对端齿连接及变轴力这二大特点, 本文就轴向预紧端齿连接转子的强度及动力特性以及相应分析方法进行讨论。首先说明端齿连接及变轴力对于转子强度及动力特性的影响, 然后从相应分析方法及分析内容两个方面, 针对以往工作的不足作出必要的补充。

主题词: 轴向载荷 轴向应力 应力分析 动力特性 强度 分析方法

1 前言

现代中小型桨轴发动机多采用端齿来连接各个转动部件以传递载荷, 通过一中心拉杆施加适当的轴向预紧力, 以保证整个转子在发动机各种工况下都不致出现松脱并能正常运转。显然, 端齿连接以及存在于拉杆及鼓筒中数值很大且随工况而变化的轴向力, 是这类转子的两个特点, 这两个特点对于转子的强度及动力特性以及相应分析方法都会具有很大影响。以往工作中没有或未细考虑这两个特点, 据此设计的转子有可能出现强度及动力特性方面的故障。在进行“端齿连接转子强度刚度研究”及“轴向预紧端齿连接转子动力特性研究”的基础上, 本文对这类转子的强度及动力特性以及相应分析方法进行讨论, 先说明端齿连接及变轴力对于转子强度及动力特性的影响, 然后针对以往工作不足对相应分析方法内容进行补充。

2 对转子强度及动力特性的影响

2.1 接触传力及分区循环对称性

轴向预紧端齿连接转子的各转动部件之间是通过相对端齿齿牙之间的接触来传递载荷, 这与整体转子有本质不同。例如, 在传递扭矩时, 端齿连接就会产生整体转子中不出现的附加的轴向力(参见图1)。轴向预紧端齿连接转子的受力还具有分区循环对称特性^[1, 2]。叶片及轮盘外缘具有由叶片片数 N_b 决定的 N_b 次循环对称性, 用该处的一个 $(2\pi/N_b)$ “扇形”段即可表征其受力情况。对于某二级转子间的端齿连接处, 其位移及应力分布具有由该处单侧端齿齿牙数 N_c 决定的 N_c 次循环对称性, 各级转子轮盘内部为轴对称受力状态。至于以上循环对称次数不同的各循环对称分区之间, 是不具备任何对称性的所谓“过渡区”。图2是这种受力特点的一个示例(图中1端齿, 2鼓筒左端, 3鼓筒中部, 4轮盘内部, 5轮盘中

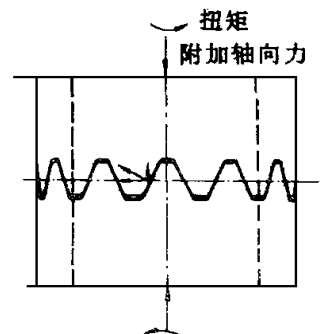


图1 承受扭矩的端齿连接轴段

部, 6 榫头, 7 轮盘外部, 8 叶身)。

2 2 端齿及变轴力对转子刚度及动力特性的影响

与整体转子相比, 端齿连接对于转子的弯曲刚度会有所降低。文献[3、4]指出, 可通过端齿轴段的三维有限元接触应力分析的结果, 在一定假设基础上, 按梁的变形及受力方式整理得出一种梁元刚度矩阵, 称为“端齿梁元”刚阵, 代替以往采用的一般梁元刚阵, 可用端齿梁元刚阵来更准确地表示含端齿轴段的刚度。针对 4 种发动机中采用的 20 对端齿连接进行了大量计算分析^[5], 结果表明, 端齿梁元的刚度约为相应整体梁元刚度的 30~60%。

前已指出, 各个转子部件是在一定轴向预紧力作用下连接在一起, 中心拉杆、鼓筒及轮盘有关部位中分别承受着拉力或压力。在不同工况下, 由于转子承受的气动力、离心力、热载荷及机动载

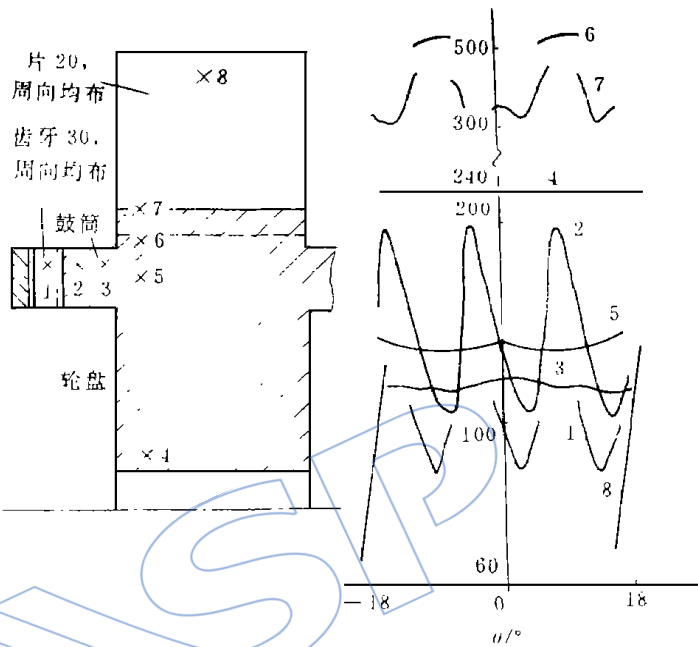


图 2 分区循环对称受力示例

荷等各有所变化, 它们对上述轴向力也会产生影响, 从而产生了轴向力随工况变化的变轴力问题。文献[6、7]中用光弹实验与计算方法研究了某发动机第 1 级压气机转子中离心力对于轴向力的影响。结果表明, 在 45000r/min 的高转速下, 上述轴向力下降了 13.5% (计算结果) 或 15.9% (实验结果)。必须指出, 转子承受的各种载荷中, 以离心载荷及热载荷对轴向力的影响最大。显然, 端齿连接造成的弯曲刚度削弱及变轴力造成的轴力刚阵变化, 都会对转子的动力特性带来影响。表 1 列出了不考虑端齿及/或变轴力影响时, 算出的某发动机组合压气

表 1 各种因素对临界转速的影响

计算状况	组合压气机				准燃气发生器	
	一阶	二阶	三阶	四阶	一阶	二阶
不计轴力、端齿	37.6%	18.2%	21.5%	1.73%	6.50%	6.98%
不计变轴力、端齿	1.96%	18.6%	6.80%	1.70%	6.53%	7.14%
不计端齿	0.13%	18.7%	0.02%	1.66%	6.52%	7.04%
不计轴力	37.6%	0.21%	21.7%	0.06%	0.01%	0.03%
不计变轴力	1.63%	0.12%	6.77%	0.01%	0.00%	0.04%
不计陀螺力矩	0.10%	3.18%	0.18%	9.11%	0.42%	12.3%
不计剪切变形	0.56%	12.7%	0.76%	11.8%	5.97%	9.09%

机转子及准燃气发生器转子临界转速相对于“准确解”的误差。作为对比,表中也列出了不计陀螺力矩或剪切变形时结果的误差。这里的“准确解”既考虑了端齿及变轴力的影响,也考虑了陀螺力矩及剪切变形的影响。由该表可以看出,轴向预紧力对组合压气机转子临界转速的影响最高达 37.6%,端齿的影响最高达 18.7%,而变轴力的影响最高时也达 6.8%。至于陀螺力矩及剪切变形的影响,一般不大于 3%,少数超过 10%,最高时仅达 12.3% 及 12.7%。这就是说,端齿及变轴力的影响不亚于甚至还大于陀螺力矩及剪切变形的影响。

3 轴向预紧端齿连接转子的强度及动力特性分析

无论是对涡轴、涡桨发动机,还是涡喷、涡扇发动机,虽然目前国内尚未明确提出成文的转子强度及动力特性分析要求,但在这方面已作过不少探索。在国外,P. W. 公司曾为美国空军进行过专门研究,在文献[8]中对于转子中的盘、轴、叶片的静强度、动强度、刚度、寿命及转子系统的临界转速、弯曲变形、轴承载荷、响应、稳定性等提出了一系列分析要求。这些针对涡喷、涡扇发动机提出的要求原则上也适用于涡轴涡桨发动机,这里只是针对轴向预紧端齿连接转子的上述两个特点,从分析要求及实现这些要求的部份分析方法这一方面,对以往工作的不足之处作一补充。

3.1 分析要求

对于轴向预紧端齿连接转子,其与非端齿连接转子相同的部份需进行同样的强度及动力特性分析。除此之外,还必须专门对中心拉杆及端齿进行必要的强度及寿命分析,包括端齿静强度、中心拉杆与前后轴颈接触处的接触强度及微动磨损等。对于端齿结构周向不均匀可能引起的不稳定性,也应当进行专门的分析。此外,这类转子的轴向预紧力的规定值也是一个需通过专门分析确定的关键数值。该力的大小既要能保证转子不松脱以便正常运转,又不应使中心拉杆及有关零件的强度及寿命储备过低。在可能情况下,它还应使转子具有好的动力特性。为此,设计过程中必须计算分析多种工况下气动力、离心力、热载荷及机动载荷对轴向预紧力的影响,综合考虑选择一适当的预紧力数值。

3.2 分析方法

从强度、刚度及寿命方面考虑,应力分析方法应能处理零部件间接触传力,如相邻端齿齿牙间、叶片榫头与轮盘榫槽间、带冠叶片相邻叶冠间的接触传力。考虑到相互接触的零件多为三维实体,分析时最好采用三维接触分析方法及程序。

对于这类转子,还应在分析方法中尽量利用其分区循环对称的受力特点。考察转子中具有 N 次循环对称性的某一分区时,可根据森文南原理,只保留该区域结构及载荷的真实性,其它区域则简化为相应轴对称结构,这样整个转子可化作一个 N 次循环对称的结构处理。至于转子中不具备任何对称性的“过渡区”,则可根据叠加原理,利用其结构轴对称而边界条件具有不同循环对称次数这一特点,将该区域的分析化为分析几个小规模的循环对称问题。分析中最好避免单独处理各个零件,因为在零件切开处人为规定边界条件会给分析结果造成较大误差,尤其是位移结果更不可靠。对于离心叶轮及整体轴流叶轮这类零件,更不应人为分成叶片及轮盘来处理,而应作为一个整体来分析。这时,分析模型中应同时采用体元、壳元及体-壳过渡元,以更逼真地模拟这类体-壳组合结构的几何形状及受力状态^[9]。这两条原则对于非端齿连接转子也是适用的。

从转子动力特性方面考虑,应采用能计及端齿及变轴力影响的分析方法。文献[10、11]中

介绍的有限元子结构模态综合法及局部有限元一变轴力传递矩阵法就具有这种功能。前者是在一般有限元模态综合法中并入了“端齿梁元”；后者则是通过端齿梁元刚阵导出含端齿轴段的传递矩阵,并在该矩阵中计及变轴力。

在发动机初步设计阶段,要进行上述复杂的转子动力特性分析是十分困难的。根据对多个发动机转子系统进行的计及端齿及变轴力影响的动力特性分析结果,可在一定程度上看出这种影响的程度及规律。除上一节中所述之外,还有端齿主要引起转子主体局部刚度削弱,这可近似地用折减弹模来体现;轴力对于直径较小的中心拉杆刚度增加较大,且轴力近似随转速平方降低;端齿及变轴力分别对以主体变形为主的振动及以拉杆变形为主的振动有较大影响等等。利用这些规律及今后进一步积累的经验,可在初步设计阶段先不顾及端齿及变轴力的准确影响,将转子系统作为无轴力或常轴力整体转子处理,再根据经验对所得动力特性分析结果作粗略修正,以此判断该转子是否符合结构设计准则。或者,也可先利用近似的端齿及变轴力影响系数,进行近似的计及端齿及变轴力影响的动力特性分析。当然,在后来的详细设计阶段,还必须采用前述方法或今后可能建立的其它方法,更准确地考虑端齿及变轴力的影响。

参 考 文 献

- 1 尹泽勇等 转子分区循环对称接触应力分析 航空学报, 1993, 14(2): 19- 25
- 2 尹泽勇 转子受力的分区循环对称特性及其处理方法 株洲航空动力机械研究所科研报告, KT207-JB-2, 1990
- 3 尹泽勇等 端齿轴段刚度及其对转子动力特性的影响 振动工程学报, 1993, 6(1): 63- 67
- 4 尹泽勇 端齿梁元的刚度矩阵 株洲航空动力机械研究所科研报告, KT215-JB-2, 1991
- 5 杨德辉 若干端齿轴段刚阵系数的分析计算 株洲航空动力机械研究所科研报告, KT215-JB-6, 1991
- 6 尹泽勇等 轴力随转速的变化及其对转子动力特性的影响 全国第三届转子动力学学术讨论会论文集, 21- 29, 1992
- 7 罗素理 轴向力随离心力变化的计算分析及实验研究 株洲航空动力机械研究所科研报告, KT215-JB-7, 1991
- 8 Price J L. Development of Turbine Engine Structural Design Criteria- Final Report Pratt & Whitney Aircraft Ltd, AFA PL-TR-76-104, 1972
- 9 尹泽勇等 发动机组合零部件应力分析及SACS程序 中国航空科技文献, HJB840186, 1984
- 10 欧圆霞 用有限元子结构模态综合法分析轴向预紧端齿连接转子的动力特性 株洲航空动力机械研究所科研报告, KT215-JB-4, 1991
- 11 李彦 用局部有限元一传递矩阵法分析轴向预紧端齿连接转子的动力特性 株洲航空动力机械研究所科研报告, KT215-JB-5

(责任编辑 王震华)