

航空发动机转子动力学算法及计算工具开发

Algorithms and Calculation Tools Development for Rotor Dynamics of Aero Engine

■ 张学宁 陈霞 张生光 胡文颖 / 中国航发研究院 黄海 / 中国航发动力所 陈成 / 中国航发动力所

目前，在航空发动机转子系统动力学计算领域所采用的计算工具几乎完全被国外产品所垄断，这限制了设计经验的有效积累，制约了设计水平的提高。本项目通过自主创新提出了一系列独具特色的算法，为自主开发一款适用于航空发动机转子系统动力学计算的工具体奠定了基础。

航空发动机是一种典型的旋转机械系统，旋转是其区别于一般振动系统的最为显著的特征，图1为LEAP发动机剖面图。旋转必然引起振动，我国航空发动机的振动问题一直比较突出，转子动力学设计是根治振动问题的关键之一，工欲善其事，必先利其器，好的设计工作离不开好的工具，我国在旋转机械系统领域所应用的转子动力学设计计算工具基本被国外软件所垄断，至今尚没有能与国外一流水准相媲美的设计计算工具。使用国外的工具有许多弊端，例如，由于不掌握工具的底层信息，很难把设计经验融入其中进行彻底的二次开发，限制了设计经验的有效积累，进而制约了正向设计能力的提升。结合行业现状和当前国际形势，打造一款一流的转子动力学设计计算工具对于提高我国旋转机械系统的设计水平颇有裨益。

算法及计算工具发展现状

目前，在转子系统动力学的设计计算领域应用的工具主要包括通用软件和专用软件两大类。通用软件以Nastran、Ansys、Abaqus等为代表；专用软件以DyRoBeS、Samcef Rotor、Dynamics R4等为代表。通用软件的



图1 LEAP发动机剖面图

优势在于耦合场的计算能力，即能够在一个平台上考虑多个物理场的影响开展转子系统动力学问题的计算；通用软件还具备较强的后处理能力，对于提高工程问题的处理效率有很大帮助。专用软件的优势在于模块功能更加精细、计算效率更高，要发挥专用软件计算效率高的优点，前提是预先对物理模型进行合理的力学简化。显然，这对使用

者提出了较高的要求，如果对计算对象不够熟悉，或者说力学储备不足，对如何进行合理有效的力学简化会感到无从下手，很难用好专用工具。用于转子系统动力学计算的软件，无论是通用软件还是专用软件，多来自美国、西欧和俄罗斯。

算法对于计算分析软件的重要性是不言而喻的。前面提及的代表性计算软件在核心算法上都有各自独到

的优势。例如，Ansys在转子动力学计算方面的优势在于其提供的参数化设计语言，使得这款计算分析工具在高封装性下依然给予使用者进行深度操作的权限。随着工程设计对精细化模型构建的迫切需求，近年来Ansys在转子系统特殊结构的算法支持上也在持续提升。Samcef Rotor以其二维傅里叶单元开发而闻名，这种单元的算法核心是对形函数的巧妙处理。DyRoBeS是一款优秀的转子动力学专用计算工具，在挤压油膜阻尼器、油膜轴承设计计算方面开发了丰富而强大的算法，为航空发动机和燃气轮机转子系统的设计提供了便利。俄罗斯的Dynamics R4是专门为燃气涡轮机械的转子动力学设计计算开发的，经过40余年的发展，这一软件积累了各个方面的计算方法，在俄罗斯整个航空动力设计领域具有重要影响。

算法研究与工具开发

我国在这个领域的专用工具开发方面也做过许多努力，以高校和相关科研院所为代表，开发过许多专用程序包，但与国际一流水平相比还有很大的差距，主要体现在：一是程序开发往往是以项目研究为背景，功能上只能解决某个特定问题，程序包的综合性和系统性不够；二是缺乏核心优势算法支撑，在计算能力方面的优势不突出；三是缺乏顶层的架构设计或者架构设计不良，导致程序的继承性不好，随着代码规模的增大，程序的执行效率和鲁棒性都难以保证；四是前后处理方面的能力较差，用户体验不好，很难在开发者和用户之间形成良性迭代互动，结果往往是还没等到经受工程应用的充分检验就折戟沉沙了。

面对这样的局面，该如何破局？

基于对先进计算工具的深入了解，创新团队把工作的重心放在了核心算法的自主创新开发上。创新团队结合多年的工作经验，明确了开发的方向和目标，把焦点聚集在拓展计算能力、提升计算效率、衔接设计准则、增强可视化效果等方面。

截至目前，创新团队已经完成了许多独具特色的创新性算法的开发，这些算法涉及航空发动机转子系统动力学计算工具开发的各个环节，部分算法为首创，填补了业界空白。

计算环节的创新算法开发

在前处理方面，提出了几何与网格的自动生成算法，可以满足航空发动机转子动力学分析中对典型部件网格划分的需求。

在求解方面，不平衡响应计算是转子动力学研究的重要内容，特别是在总体结构设计阶段，为了评估所设计的转子系统在不平衡激励下的振动水平，通常需要进行大量的不平衡响应计算，但是当前主流算法的计算效率还不能满足行业对

于快速迭代计算的需求。为此，创新团队从基本理论上对振动响应求解的问题进行了分析，提出了一种新的计算方法，典型算例的验算表明，该算法可以在保证计算精度不下降的前提下，大幅提升计算速度（见图2）。

在后处理方面，提出了转子系统多维度回旋图的自动生成算法，大大增强了可视化效果，为设计工程师进行准确的结果分析提供了便利。图3是通过该算法自动生成的模拟双转子系统的多维度回旋图。

特色功能模块开发

除了在计算工具的3大环节上提出多项创新性算法，创新团队也在特色功能模块开发方面提出了若干新型算法。在计算转子系统的动力学特性时，轴承刚度是重要的输入参数，航空发动机转子系统中使用的主轴承为滚动轴承，计算这种类型轴承的刚度参数的主流算法为Jones-Harris方法，该方法由轴承研究领域的两位美国专家Jones和Harris提出并发展完善。然而，这个算法并不完美，例如，在有些情形下所求解出的结果可能满足数学

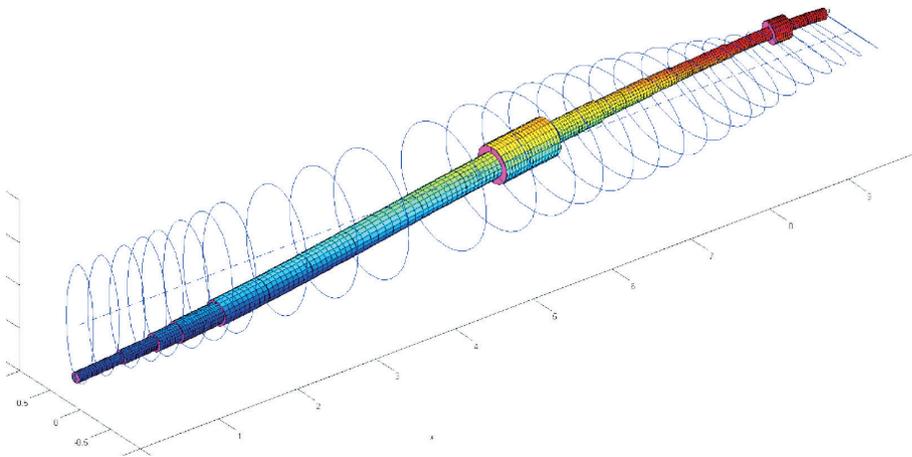


图2 采用新算法计算得到的单转子系统的振动响应形态

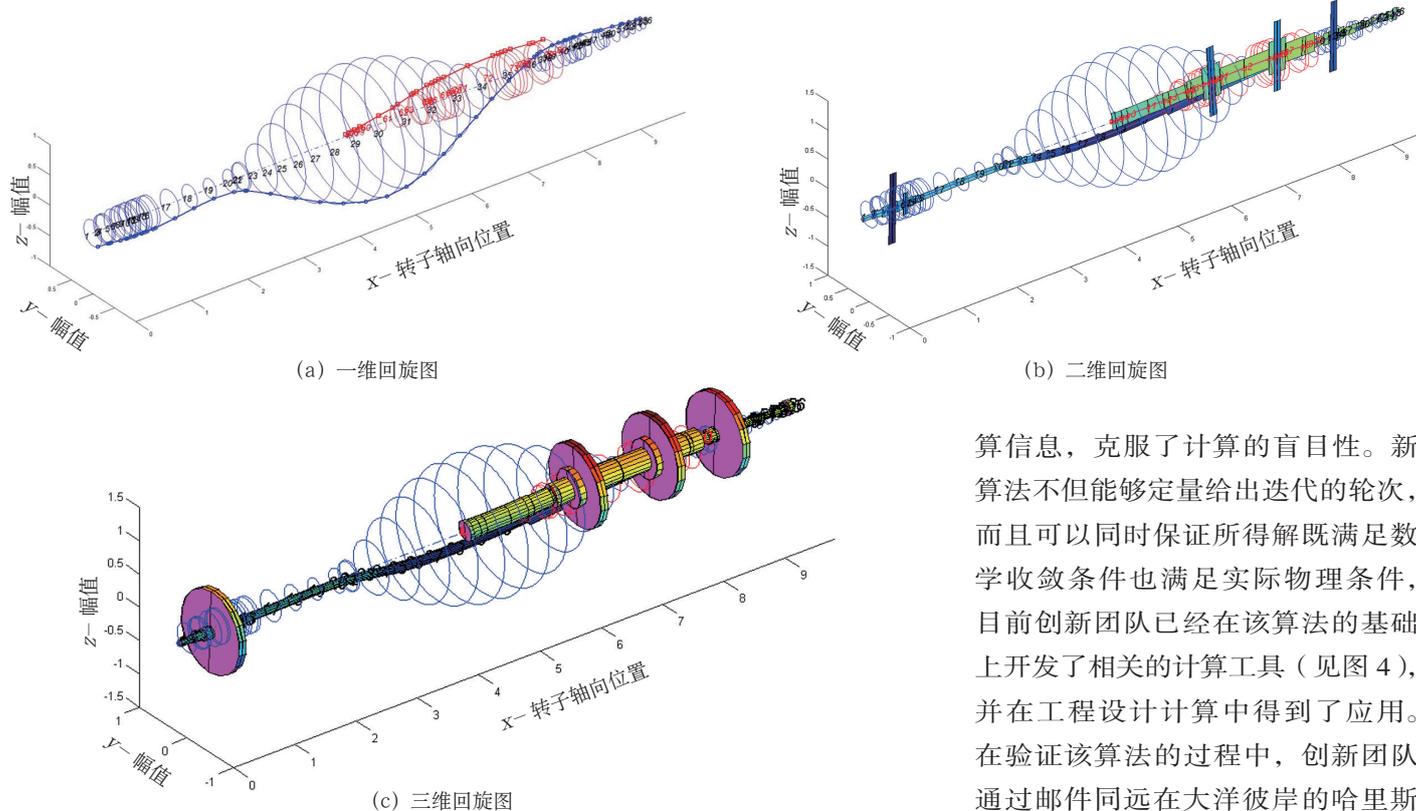


图3 转子系统多维度回旋图



图4 以创新性算法为基础开发出的轴承性能参数计算工具

上的收敛条件，但在物理上却是不合理的。当出现这种情况时，就需要尝试新的迭代初值，重新进行试算，试算的过程有可能要尝试许多

次，存在一定的盲目性。针对这一点，创新团队提出了一种新的算法，该算法充分利用了轴承的几何结构特征，并利用迭代返回值给出的试

算信息，克服了计算的盲目性。新算法不但能够定量给出迭代的轮次，而且可以同时保证所得解既满足数学收敛条件也满足实际物理条件，目前创新团队已经在该算法的基础上开发了相关的计算工具（见图4），并在工程设计计算中得到了应用。在验证该算法的过程中，创新团队通过邮件同远在大洋彼岸的哈里斯团队进行了交流，不但确定了算法的有效性，还指出了该团队的著作《滚动轴承分析》（Rolling Bearing Analysis）发行60余年来一直未被发现的疏漏，创新团队关于轴承的重要知识几乎全部来自这部行业经典著作，如今能为这部书的继续完善做一点贡献，颇感欣慰。

结束语

开发一款好的工具不是一朝一夕之事，创新团队取得的阶段性成果也只是一个开始，接下来还需要进行大量的算法开发、封装测试、迭代完善，最终接受工程应用的检验，希望这款工具将来能够发挥作用，为我国航空发动机的自主研发贡献一份力量。

航空动力

（张学宁，中国航发研究院，高级工程师，主要从事航空发动机转子系统动力学研究）