

民用航空发动机转子热弯曲问题分析

Analysis to the Bowed Rotor of Commercial Aero Engine

■ 曾涛/中国航发商发

航空发动机地面关车后，内部的热不平衡会导致转子出现热弯曲现象。转子热弯曲可能导致发动机振动超限和机械损伤，为解决转子热弯曲问题，须在发动机设计、试验和运行三方面采取相应措施。

卡塔尔航空公司是配装PW1000G发动机A320neo飞机原定的启动用户，但A320neo在交付前暴露的发动机问题，导致其拒绝接收配装了PW1000G发动机的A320neo飞机。2016年2月15日，由汉莎航空公司作为启动用户接收了首架A320neo飞机（见图1）。PW1000G初始运行中出现了两个主要问题，一是产生了大量的全权限数字式控制（FADEC）系统虚警信息，二是本文要重点讨论的转子热弯曲问题。由于严重的转子热弯曲问题，PW1000G发动机在地面重新起动发动机时要预先执行4~5min的冷运转^[1]，直接影响了航班的周转。同时，由于热弯曲导致的机械刚蹭改变了发动机高压部件的间隙，使得发动机效率下降，导致航空公司运营成本增加。面对航空公司的压力，普惠公司不得不暂停交付发动机并对发动机进行设计改进。为了解决PW1000G发动机的热弯曲问题，普惠公司对PW1000G发动机碳封严设计进行了改进，在压气机叶尖增加高强度的立方氮化硼（CBN）涂层，并在压气机轴承增加了阻尼装置。相关问题解决后，PW1000G发动机才得以恢复



图1 汉莎航空成为配装PW1000G的A320neo启动用户

交付。无独有偶，CFM国际公司的LEAP发动机也出现了发动机转子热弯曲的问题。为了解决转子热弯曲的问题，CFM国际公司在发动机起动过程中增加了30s左右的冷运转。

现代大涵道比涡扇发动机对于轻质量、高效率的要求越来越高。更轻的质量要求导致了更薄的机匣和叶盘设计。更高的热效率要求导致了更高的发动机运行温度。同时，大涵道比设计带来不同的发动机整体振动特性。这几种因素使得新型

大涵道比发动机的转子热弯曲问题远比传统中低涵道比发动机更为严重。本文综合参考国内外研究成果和国产民机型号设计经验，针对航空发动机转子热弯曲的现象特征、运行影响和设计解决措施进行讨论。

转子热弯曲现象

对于完全冷却或者正常运行的发动机而言，发动机转子的重心位置与发动机轴线保持一致。发动机地面关车后，内部存在余热，高温部件

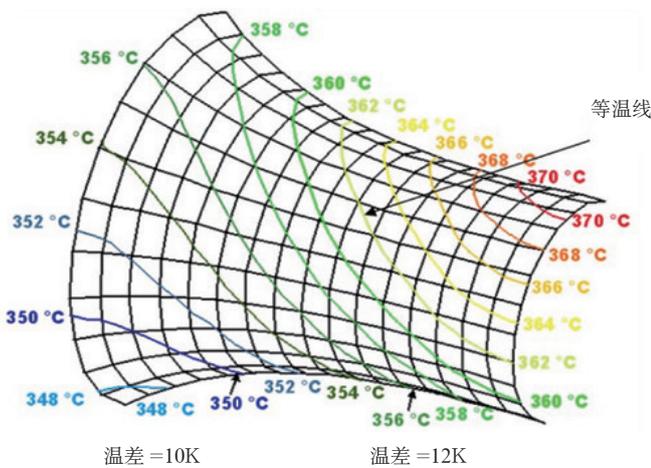


图2 关车90min后高压压气机温度分布

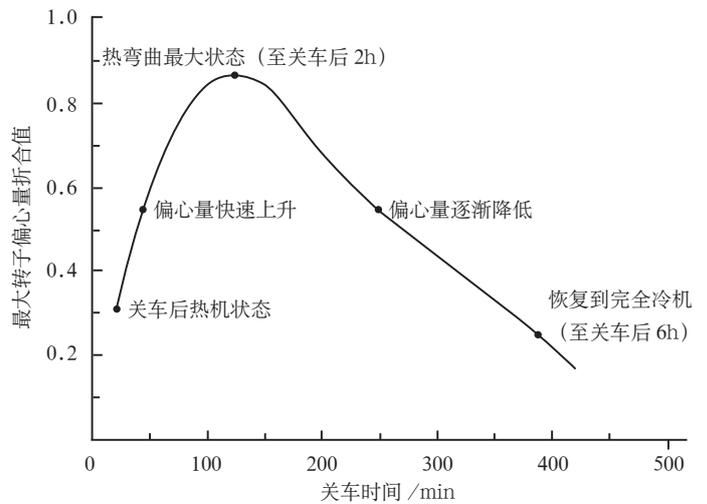


图3 发动机核心机转子偏心量随关车时间的变化示意图

会从工作温度逐渐冷却下来。由于冷却过程受到发动机结构设计、传热设计等因素影响，发动机各截面的温度出现不均匀分布。

发动机关车后，存在两个温度梯度：发动机垂直方向的温度梯度和发动机轴向的温度梯度。发动机内部自然对流换热，热空气上升，形成了垂直方向的温度梯度。同时，发动机高温部件热量沿流路的传递，导致了发动机轴向的温度梯度。

MTU公司对关车90min后的高压压气机温度分布进行了测量，如图2所示^[2]，可见温度在垂直方向和轴向均存在梯度，并呈现出越靠近燃烧室，垂直高度越高，温度越高的特点。

发动机关车后，其温度是一个逐渐下降的过程。关车后较短时间内，发动机各部件仍处于较高温度水平，发动机转子偏心水平也较低。随着关车时间增加，由于发动机内部结构和自然对流换热的影响，转子上部温度偏高，下部温度相对较低，形成垂直方向的温度梯度，导致转子重心上移。同时，发动机轴

向的余热又导致了各级转子在轴向的温度梯度。在垂直方向和轴向双重温度梯度，以及因结构形成的复杂换热路径的影响下，发动机内温度不均匀性随关车时间逐渐增大，发动机转子偏心量也随之增加。在发动机转子到达最大不平衡状态后，发动机各部件趋于冷却状态，各级转子的偏心量也逐渐减小，直至发动机冷却到冷机状态，发动机内部恢复均匀温度场，发动机转子热弯曲消失。因此，发动机转子热弯曲呈现出先增加后减小的时间特性。基于运行经验得到的转子弯曲随时间变化示意图如图3所示。

需注意的是，空中停车时发动机转子在风车效应下持续转动，不会

出现内部热不平衡，也就不会出现转子热弯曲现象。因此，转子热弯曲问题通常发生在发动机地面关车之后。

综上所述，航空发动机转子热弯曲是一种由热不平衡导致的可恢复的转子轴弯曲现象，可视作发动机地面关车后由热态到冷态转换过程的中间产物。

转子热弯曲影响

转子热弯曲通常会带来振动和间隙两方面的问题。

弯曲模态带来的发动机振动问题

发动机转子热弯曲形态会受发动机支撑形式等因素影响，不同的支撑方案将带来不同的弯曲形态，如图4所示。转子热弯曲振动特性为

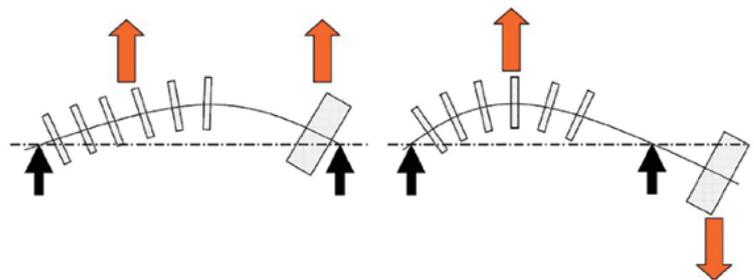


图4 转子热弯曲形态受支撑结构影响示意图

一阶振型^[4]，若在转子热弯曲的状态下执行发动机重新起动，发动机运行的振动值会明显上升。当发动机转速运行到共振转速时，有可能导致发动机振动严重超限甚至机械损伤。若共振转速高于发动机慢车转速，发动机可以通过起动后热机运行消除转子热弯曲。但若共振转速低于发动机慢车转速，则将导致发动机起动过程中出现振动超限甚至机械损伤，发动机无法起动。

转子叶尖间隙改变导致的机械损伤

转子热弯曲状态下的发动机运行可以视为一个弯曲的转轴以固定支点为圆心进行周向运行。由于转子热弯曲导致的偏心，发动机转子叶片叶尖间隙分布发生变化，转子叶片旋转过程可能与机匣发生刮蹭，从而导致叶尖间隙增大，发动机性能衰退，严重情况下甚至可能导致叶片和机匣的机械损伤进而影响发动机安全运行。

转子热弯曲的数值建模分析

为了在设计中对发动机的转子热弯曲特性进行评估和检查，有必要对发动机转子热弯曲现象进行数值建模。基于对热弯曲过程的分析，转子热弯曲的数值建模应考虑转子几何特征、初始温度场、转子温度场的垂直方向和轴向梯度、转子内的温降曲线等因素。通过数值建模，应能确定弯曲转子状态下的发动机轴弯曲形态和弯曲转子状态下的振动特性，包括共振转速、振动幅值。

莱昂纳多和迈克尔在文献[3]中给出了一种转子热弯曲的数值模拟方法。结合数学模型、有限元分析和试验数据，莱昂纳多和迈克尔给

出了发动机转子热弯曲敏感性公式，并认为发动机转子热弯曲受到支撑结构、温度梯度和对流换热特性等关键因素的影响。

转子热弯曲的解决方法

转子热弯曲是叶轮机中的普遍现象。现代涡扇发动机对于轻质量、高效率的要求，使得现代高涵道比涡扇发动机的转子热弯曲问题变得愈加突出。如同PW1000G发动机运行体现出的，转子热弯曲已经成为现代航空发动机设计必须重视的一个问题。基于前述对转子热弯曲产生过程和影响机理的分析，并结合已有型号经验，分别就发动机设计、试验和运行使用给出建议解决措施如下。

发动机设计中的转子热弯曲考虑

发动机设计中应综合考虑发动机传热、强度和叶尖间隙设计三方面因素对发动机弯曲转子特性进行设计优化。

一是优化关车后传热设计。发动机设计中应开展关车后热特性分析，对封严方案进行优化设计，降低发动机关车后的垂直温度梯度。以PW1000G为例，为解决弯曲转子问题对第3级高压压气机轴承的空气碳封严进行了改进^[4]，以改善发动机关车后的热不平衡状态。

二是优化转子支撑结构设计。转子支撑结构设计中应考虑两方面因素：一是在发动机支撑结构设计中考虑转子热弯曲的影响，对弯曲模态和共振转速进行控制；二是在支撑系统上增加阻尼装置，降低转子热弯曲运行的振动值。以PW1000G项目为例，普惠公司在第3级压气机和第4级压气机轴承上增

加了阻尼装置^[4]。

三是优化叶尖间隙设计。叶尖间隙设计中预先考虑转子热弯曲问题，改进叶尖涂层，保证碰磨后的效率。以PW1000G项目为例，普惠公司在高压压气机叶尖增加了高强度的立方氮化硼（CBN）涂层，使叶尖碰磨机匣耐磨层后仍可保持封严^[4]。

发动机试验中的转子热弯曲考虑

发动机试验中建议开展弯曲转子特性摸底，并在试验操纵程序中考虑防护措施。

首先，开展核心机和整机转子热弯曲特性检查，对不同关车时间后发动机重新起动过程中的振动、叶尖间隙特性进行试验测量；其次，发动机试验操作程序中应增加充分的冷运转或者热车程序以降低发动机的转子弯曲水平。

发动机运行使用中的转子热弯曲解决措施

发动机的装机运行使用中，也可采用进一步措施处理转子热弯曲问题。

一是起动中冷运转。若在起动过程中遭遇转子热弯曲问题，可通过在起动过程中增加一定时间的冷运转（干运转）来消除转子热弯曲，然后执行正常起动程序。以双轴发动机为例，正常起动过程的 $N2$ 变化示意如图5所示，增加冷运转起动过程的 $N2$ 变化示意如图6所示。图中起动时间为标准天条件下的参考值； $N2$ 进行了无量纲化，为发动机核心机转速 N 与慢车状态核心机转速 N_{idle} 的比值。以LEAP发动机为例，在起动过程中增加了30s左右的冷运转时间以消除转子热弯曲保证正常起动。此方案会增加发动机起动时间，但就总体而言对发动机航线使用影响较小，建议在

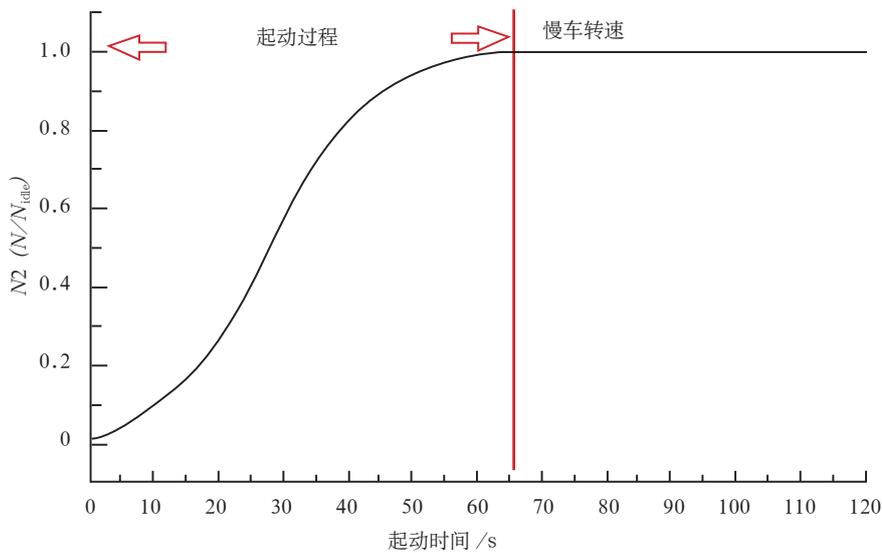


图5 无转子热弯曲起动过程 N_2 变化示意图

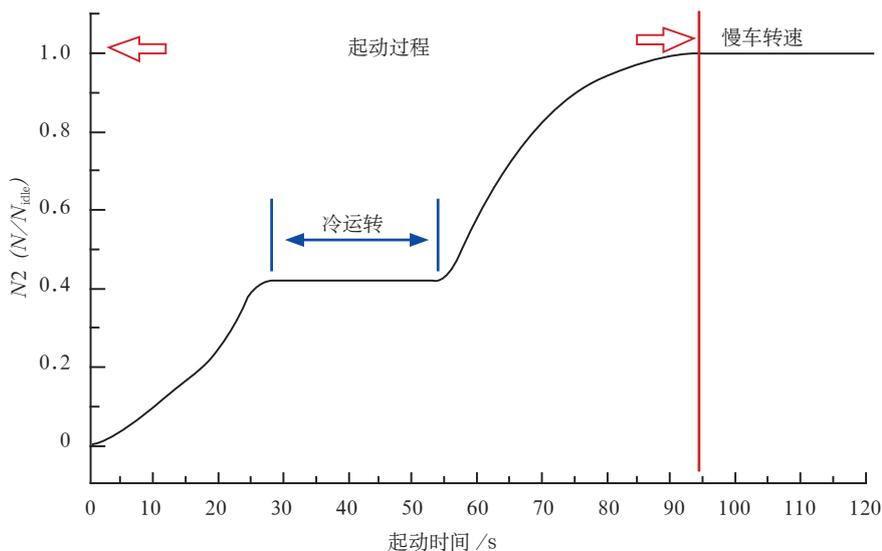


图6 转子热弯曲状态下起动过程 N_2 变化示意图

设计中按需使用。

二是关车前低功率热机。在条件允许的情况下，可以在关车前执行一定时间慢车热机，降低发动机内温度水平，进而改善转子热弯曲问题。PW1500G发动机的试车指南中，要求停车前在低于70% N_2 的状态至少运转10min，其主要目的是为了减轻转子热弯曲问题。该措施对

航线运行会产生影响，需与飞机方及航空公司充分沟通后采用。

三是关车后冷运转。在条件允许的情况下，可以在发动机关车后补充执行冷运转，通过强制通风手段降低发动机内余温，改善转子热弯曲问题。与关车前热机相似，该措施也需与飞机方及航空公司充分沟通后采用。

结束语

对于航空发动机，转子热弯曲是指由发动机关车后热不平衡导致的可恢复的转子轴弯曲现象。该现象主要发生在地面关车后，受到关车后温度梯度和发动机转子支撑结构等因素的影响。转子热弯曲可能导致发动机振动超限和机械损伤。因此须在航空发动机设计和运行中充分考虑热弯曲的影响。本文综合已有研究成果和型号经验，在发动机设计、试验和运行三方面给出了处理转子热弯曲问题的建议措施，希望为相关设计人员提供参考。航空动力

(曾涛，高级工程师，中国航发商发，主要从事航空发动机集成设计和验证工作)

参考文献：

- [1] Kjelgaard C. Initial Service Problems of New Engine Now Over, Assures Pratt [EB/OL].(2016-06-12)[2018-10-15].<http://runwaygirlnetwork.com/2016/06/12/initial-service-problems-of-new-engine-now-over-assures-pratt.html>.
- [2] Diepolder W. Design Features and Procedures to Reduce the Phenomenon of HP-Rotor Bow on Jet Engines[EB/OL].(2013-10-1)[2018-10-15].http://www.mtu.de/en/technologies/engineering_news/development/Diepolder_Design_features_and_procedures_en.pdf.
- [3] Baldassarre L. Modeling of Rotor Bow during Hot Restart in Centrifugal Compressors [J]. Proceedings of the 29 Turbomachinery Symposium, 2010:2-5.
- [4] 罗挺. 转子热弯曲系统的模态动平衡方法研究[J]. 机床与液压, 2012, 40(3).
- [5] 林富生, 孟光. 有初弯的刚度非对称转子的动力学特性分析及实验研究[J]. 应用力学学报, 2002, 19(3):96-97.