

策划：朱卫兵 焦静波
李泽林 / 文 姜楠 / 图

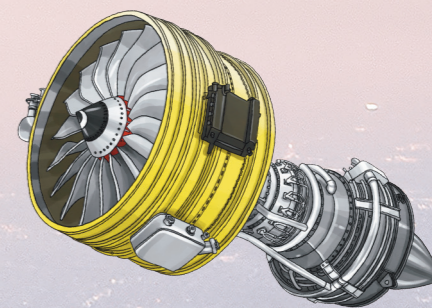
航空发动机科普丛书

发仔最「靓」的仔「皇冠上的明珠」航空发动机 (第2册)

中国航发融媒体中心◎编



发仔最“靓”的仔



“皇冠上的明珠”航空发动机

(第2册)

中国航发融媒体中心◎编

你知道航空发动机研制有多难吗？



分类建议：科普
人民邮电出版社网址：www.ptpress.com.cn

ISBN 978-7-115-66158-6



9 787115 661586 >

人民邮电出版社

中国工信出版集团

人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



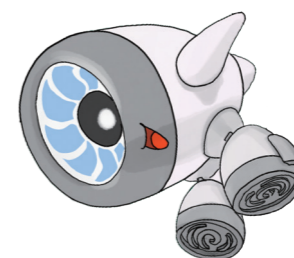
航空发动机科普丛书

发仔 最“靓”的仔

“皇冠上的明珠”航空发动机

(第2册)

中国航发融媒体中心◎编



人民邮电出版社
北京



目录

图书在版编目(CIP)数据

发仔最“靓”的仔：“皇冠上的明珠”航空发动机·第2册 / 中国航发融媒体中心编. — 北京：人民邮电出版社，2025. — (航空发动机科普丛书). — ISBN 978-7-115-66158-6

I . V23-49

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2024HQ0720 号

内容提要

航空发动机是国之重器，是国家科技实力和创新能力的重要体现。本书从飞机起飞原理，到航空发动机的设计制造，再到原型机试验以及适航等，多方面介绍航空发动机的相关知识。本书内容简洁、插图精美，特别适合对航空发动机感兴趣的青少年读者阅读。

◆ 编 中国航发融媒体中心
责任编辑 刘盛平
责任印制 马振武

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <https://www.ptpress.com.cn>
北京鑫丰华彩印有限公司印刷

◆ 开本：889×1194 1/16
印张：2.5 2025 年 2 月第 1 版
字数：50 千字 2025 年 2 月北京第 1 次印刷

定价：59.80 元

读者服务热线：(010)81055410 印装质量热线：(010)81055316

反盗版热线：(010)81055315

飞起来困难重重	2
让飞机飞起来更不容易	6
航空发动机研制极其难	8
设计：考虑因素极其多	10
制造：生产要求极其精	14
装配：工艺规程极其细	16
试验：过程控制极其严	18
验证机：测试挑战极大	24
原型机：试验风险极高	28
适航：安全要求极其细	32



夜空中，一盏盏承载着美好祝愿的孔明灯缓缓上升。

孔明灯里有火加热，使灯内的空气温度上升，密度变小，比外界的空气轻，从而产生向上的浮力，带动孔明灯向上飞。热气球也是利用这个原理升空的。但是，要把比孔明灯和热气球重得多的物体送上天空可就困难重重了。

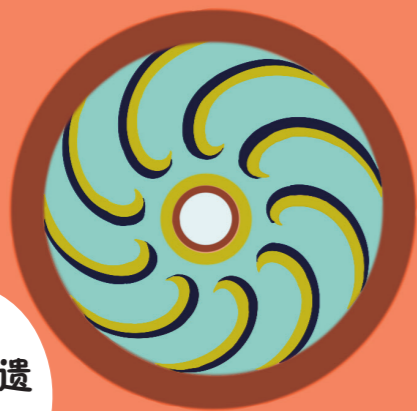


像鸟儿一样在天空飞翔，是中华民族自古以来的梦想。中华上下五千年，不同时期都有着飞翔的印记，其中重要的代表之一就是风筝。

当风筝与风的方向形成一定角度时，风筝上方空气的流速快，施加在风筝表面向下的压力较小，风筝下方空气的流速慢，产生较大的从下向上的压力，二者形成的压力差就把风筝带上了天空。



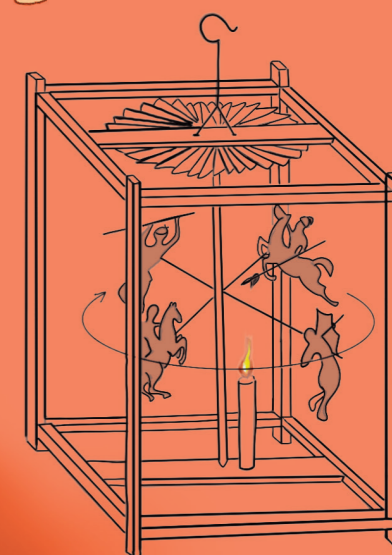
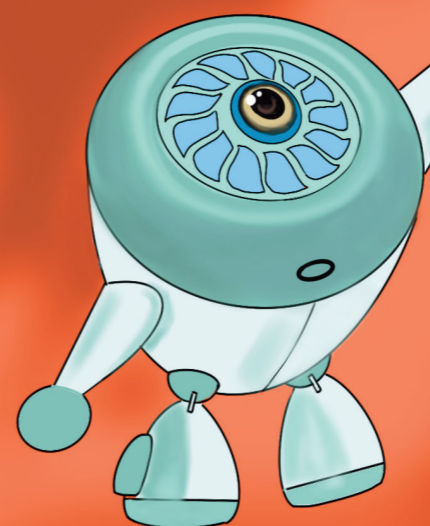
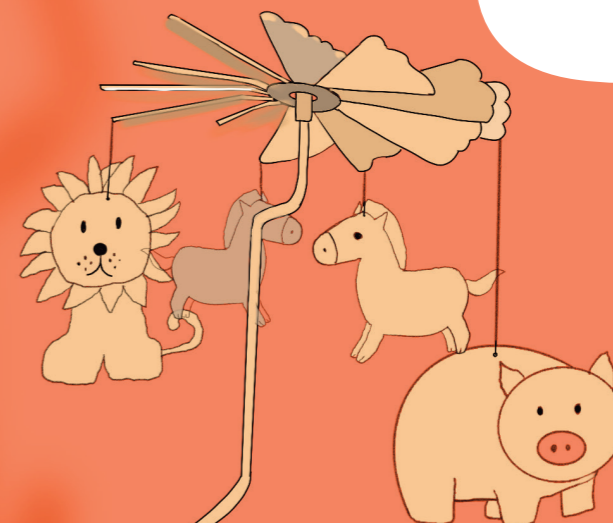
要想飞得高、
飞得快、飞得远，
必须有动力。



在三星堆等遗址出土的文物中，有大量的涡型器和涡纹流动图案，说明我国古人很早就发现了水流、气流旋转产生的涡流现象。

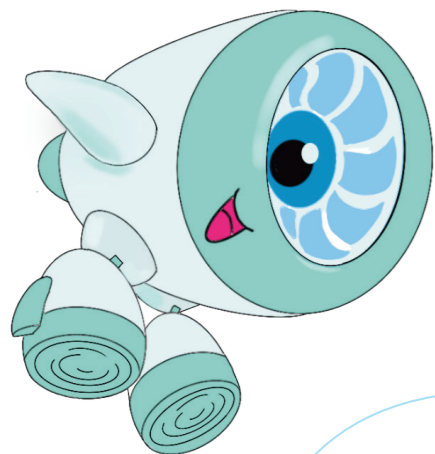
走马灯利用热空气驱动叶轮运动，上升的热气流形成涡流，带动走马灯旋转。这与现代燃气涡轮的工作原理非常相似。

如果把走马灯横过来，让热气流横向流动，走马灯就会产生推力。



让飞机飞起来更不容易

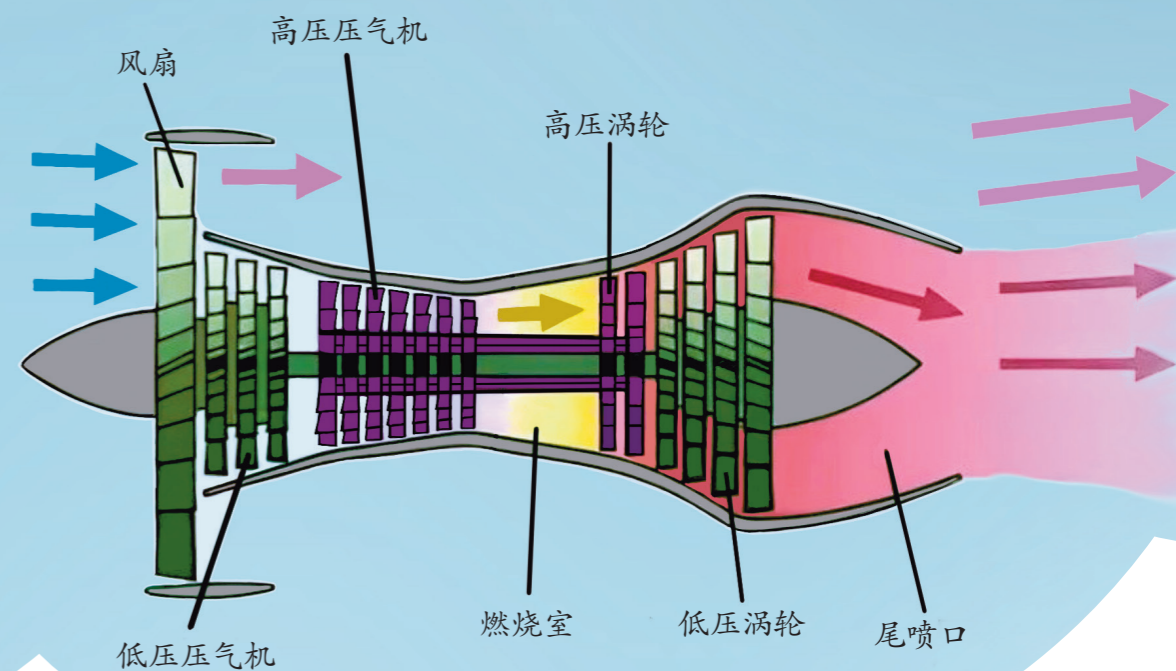
小朋友们，随着阵阵轰鸣声，数百吨重的飞机昂首起飞，你们知道为什么飞机能飞上天空吗？



没错，靠的就是被誉为现代工业“皇冠上的明珠”——航空发动机。

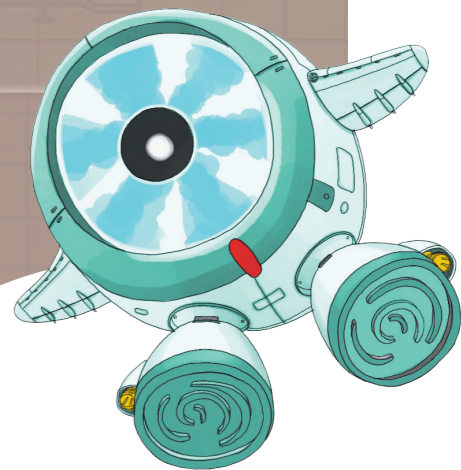
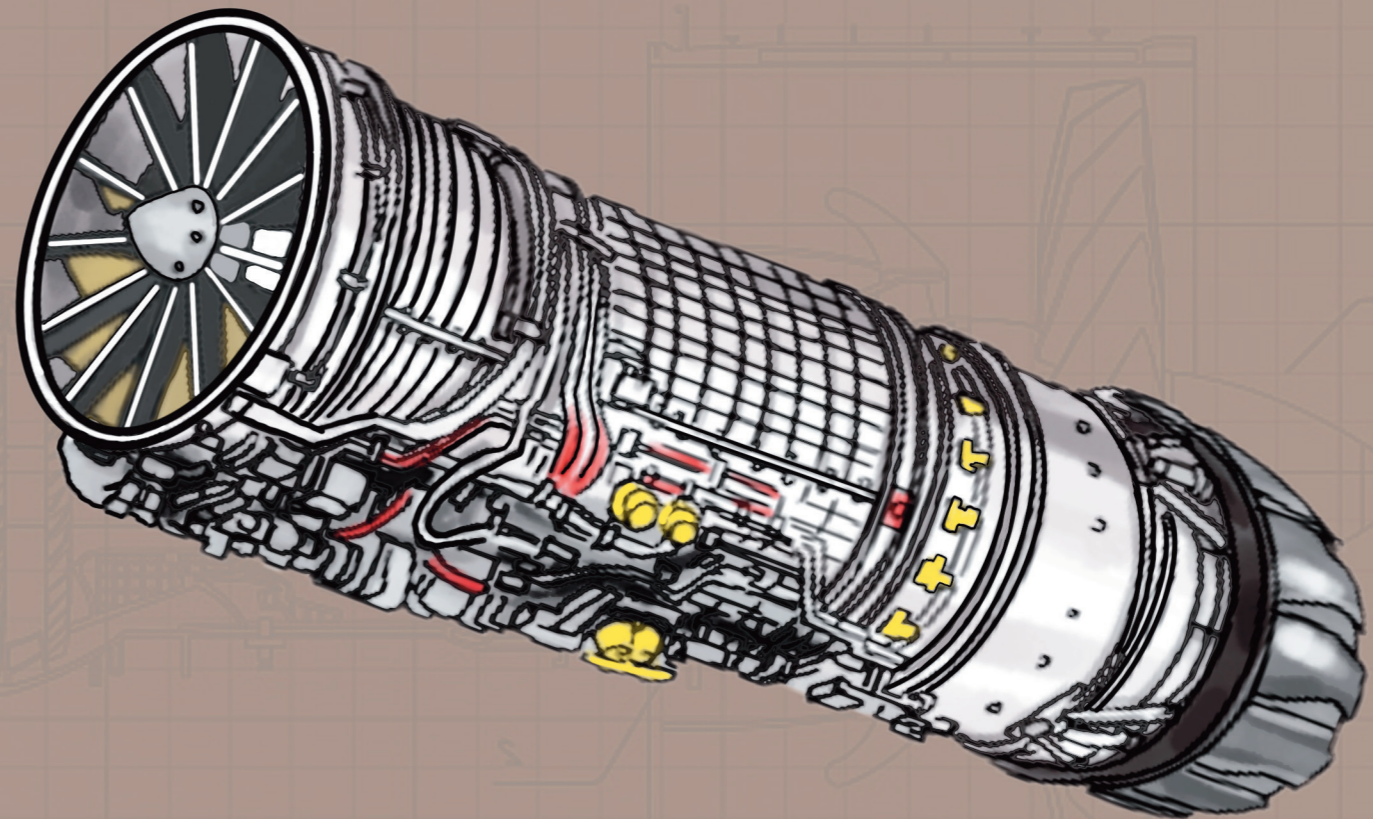
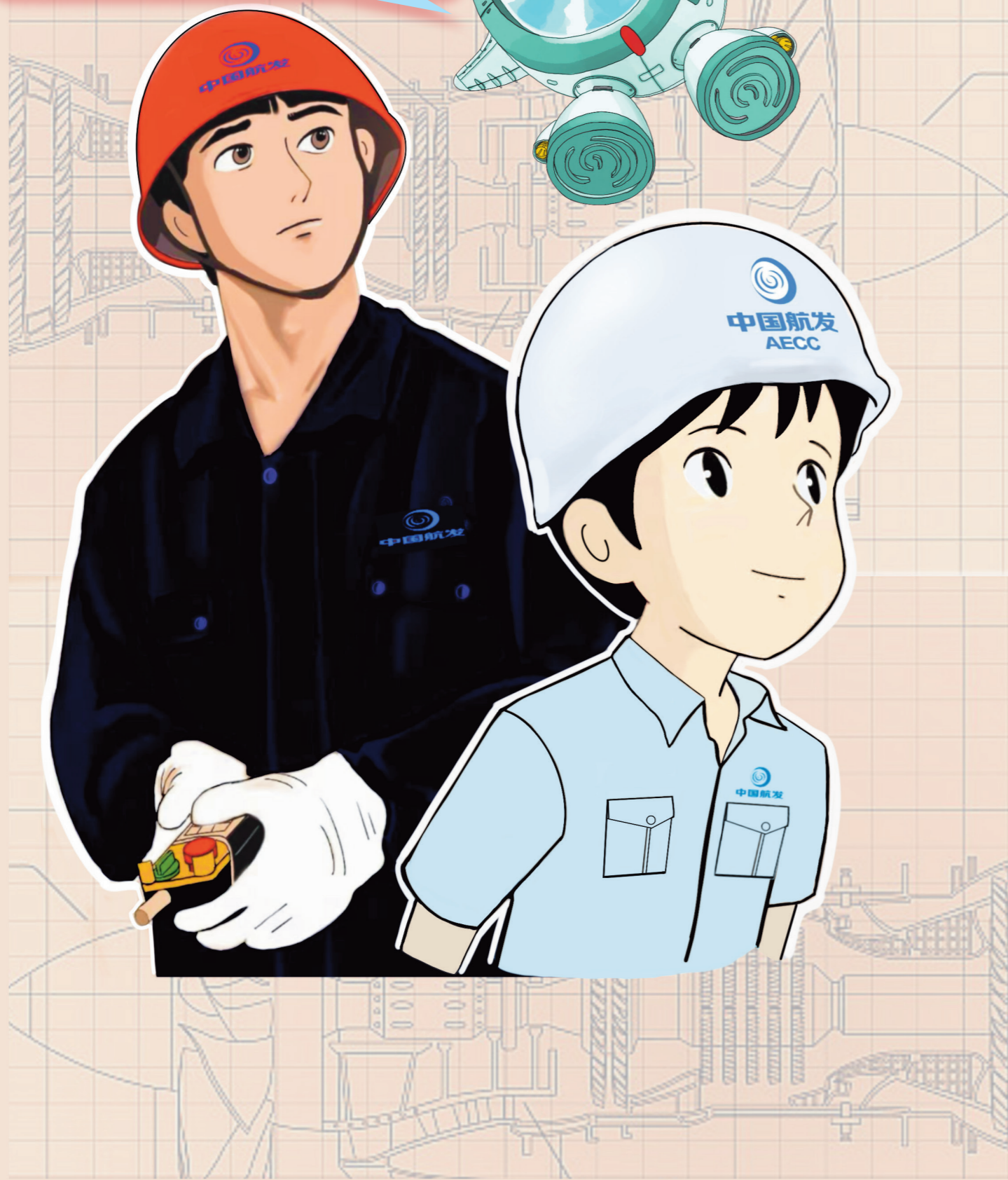
如同走马灯横过来一样，航空发动机吸入大量的空气，燃烧喷出气体，产生向前的推力，让飞机滑行。如同风筝一样，当飞机滑行到一定速度时，机翼上方空气的流速会远远超过下方空气的流速，在机翼上下巨大压力差的作用下，飞机就飞起来了。

没有航空发动机的强大动力，飞机这个庞然大物是不可能飞上天空的，所以航空发动机也被称作飞机的“心脏”。



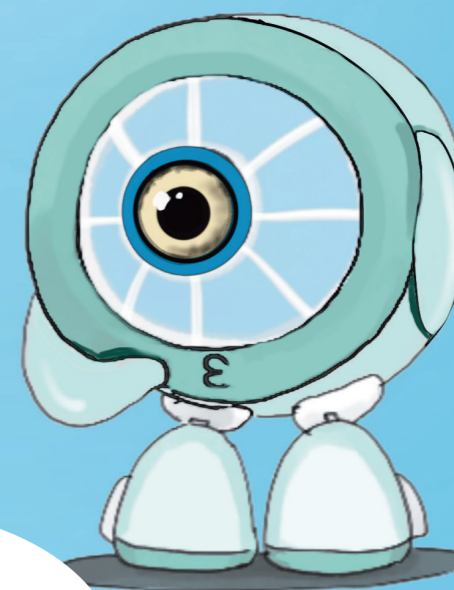
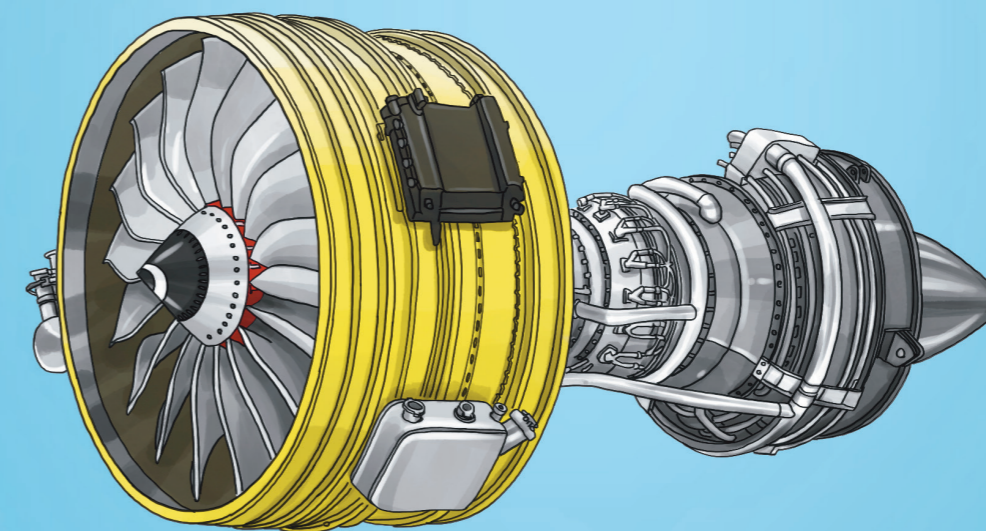
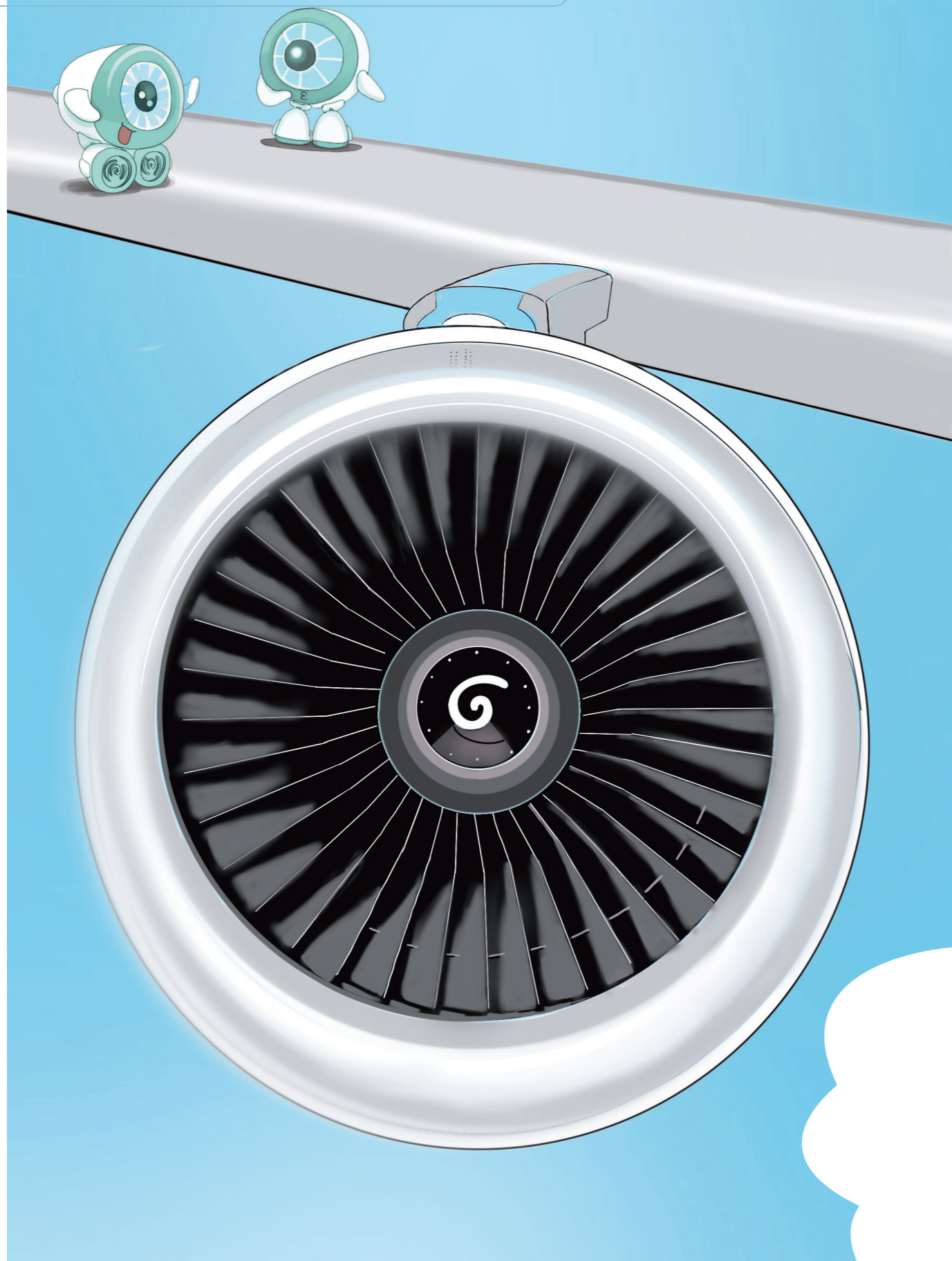
航空发动机研制极其难

跟着发仔一起来看看航空发动机的研制历程吧!



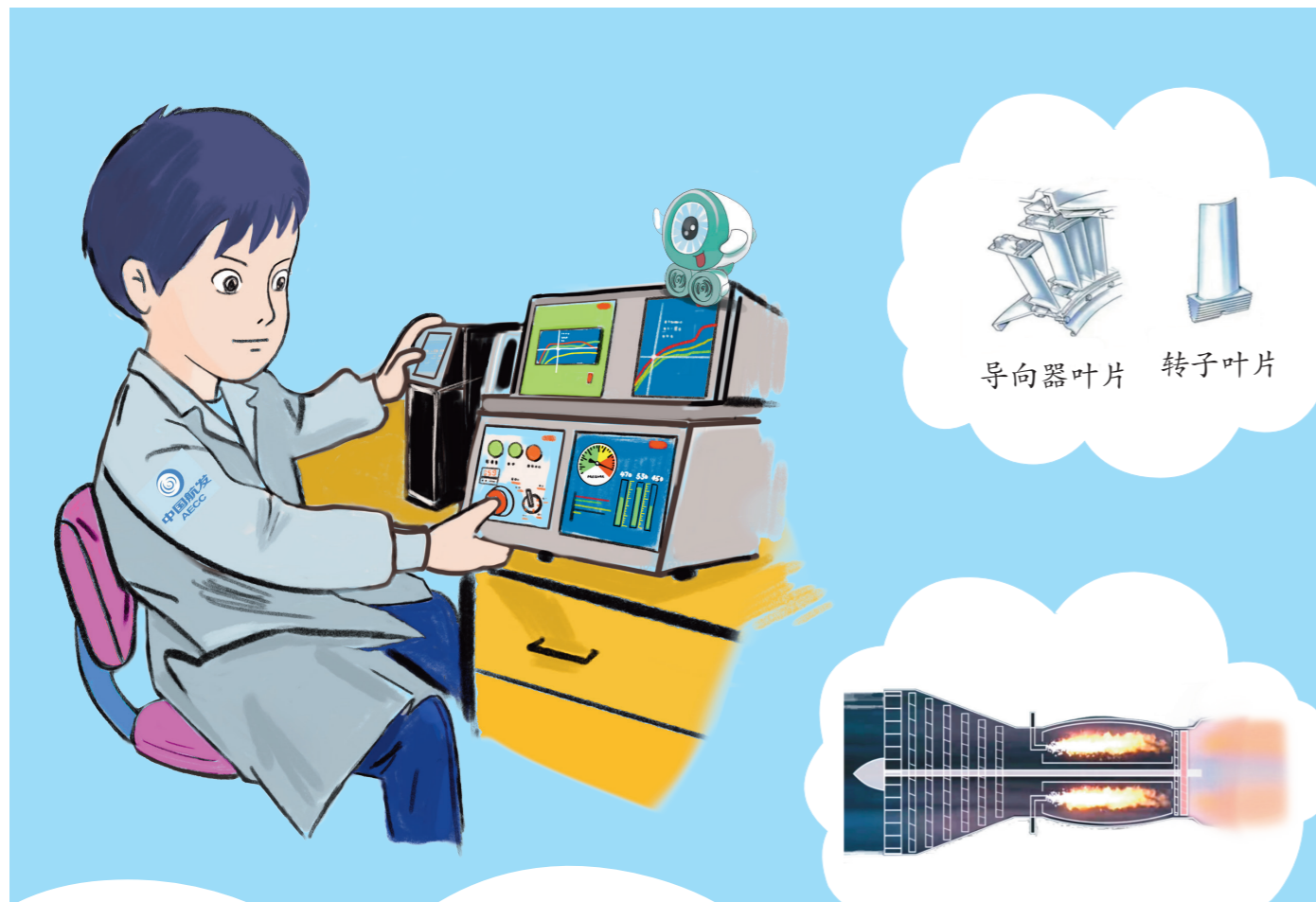
从一开始的图纸设计，到研制一个个零件，把零件组装成核心机，再从核心机升级到验证机、原型机，最后装上飞机服役，这个过程十分漫长，往往需要十余年的时间，耗尽一代人的宝贵青春。

设计：考虑因素极其多

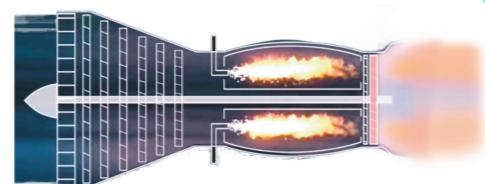


航空发动机由风扇、压气机、燃烧室、涡轮、尾喷管和外部管路附件等部分组成，每个部分有若干组件和零件。

一般的民航飞机的发动机有数十万个零件，要把这些零件紧密排布在直径两米多、长度四米左右的圆筒内，相当于在“螺蛳壳里做道场”。

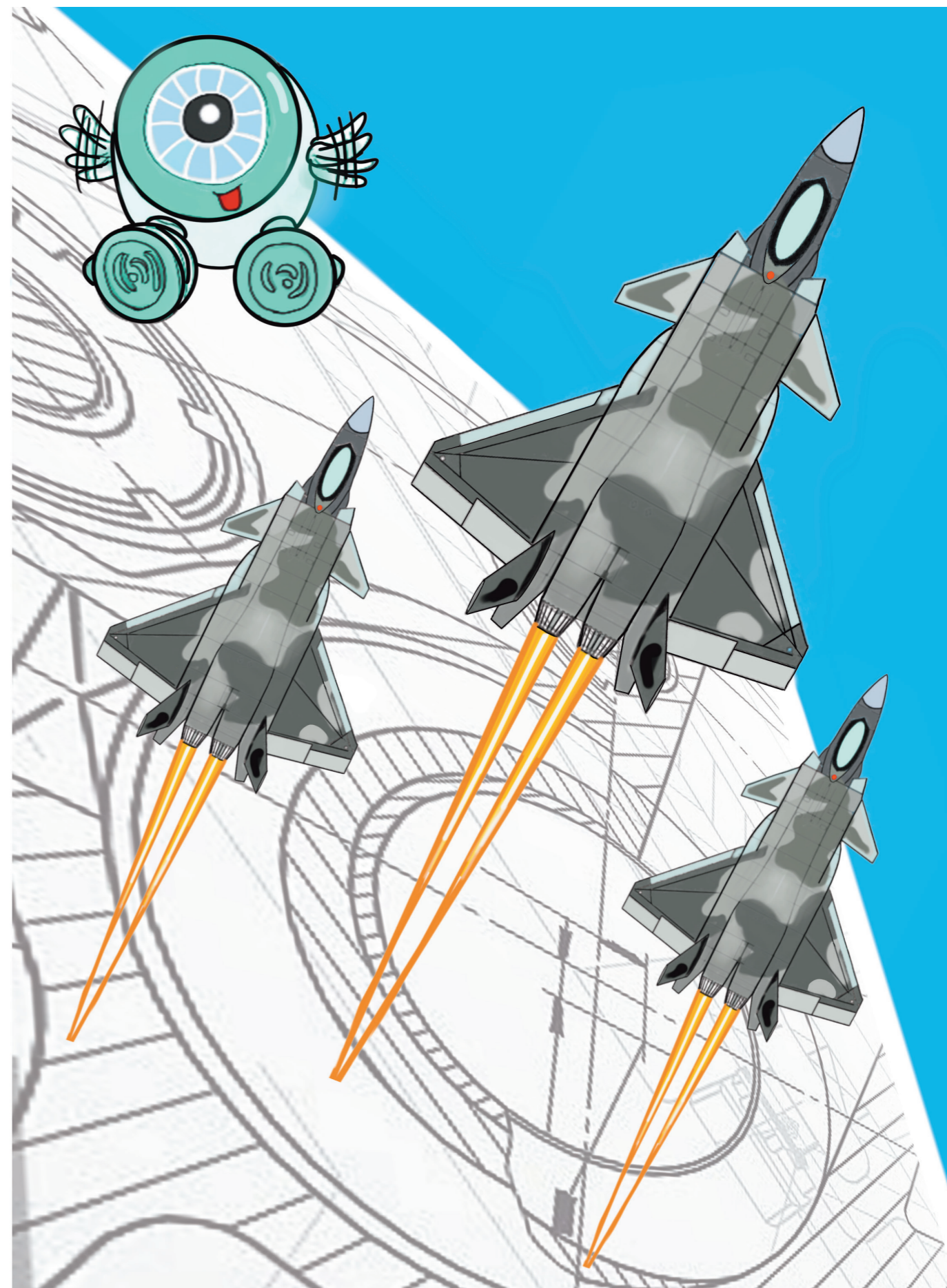


导向器叶片 转子叶片

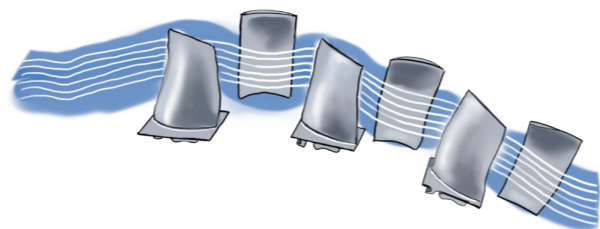


航空发动机是一种复杂的热力机械。研发航空发动机，最开始要做的工作是设计。在这个环节，不仅要考虑整机质量、结构强度、性能指标等，还要考虑零件的尺寸、材质以及不同温度、压力下的变形等因素，这就需要机械学、材料学、空气动力学、燃烧学等各领域的专家反复设计、计算。例如，要计算压气机的工作效率，需要运算能力为千亿次级别的超级计算机连续工作 24 小时。

图纸设计出来后，还要考虑能不能制造出来，就算拥有全套的航空发动机图纸，世界上也只有极少数国家能够将它造出来。

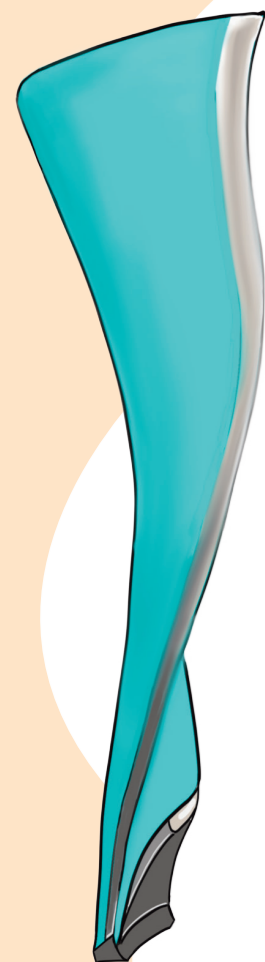


小朋友们快看！这就是气流在叶片间流动的样子。



压气机转子叶片

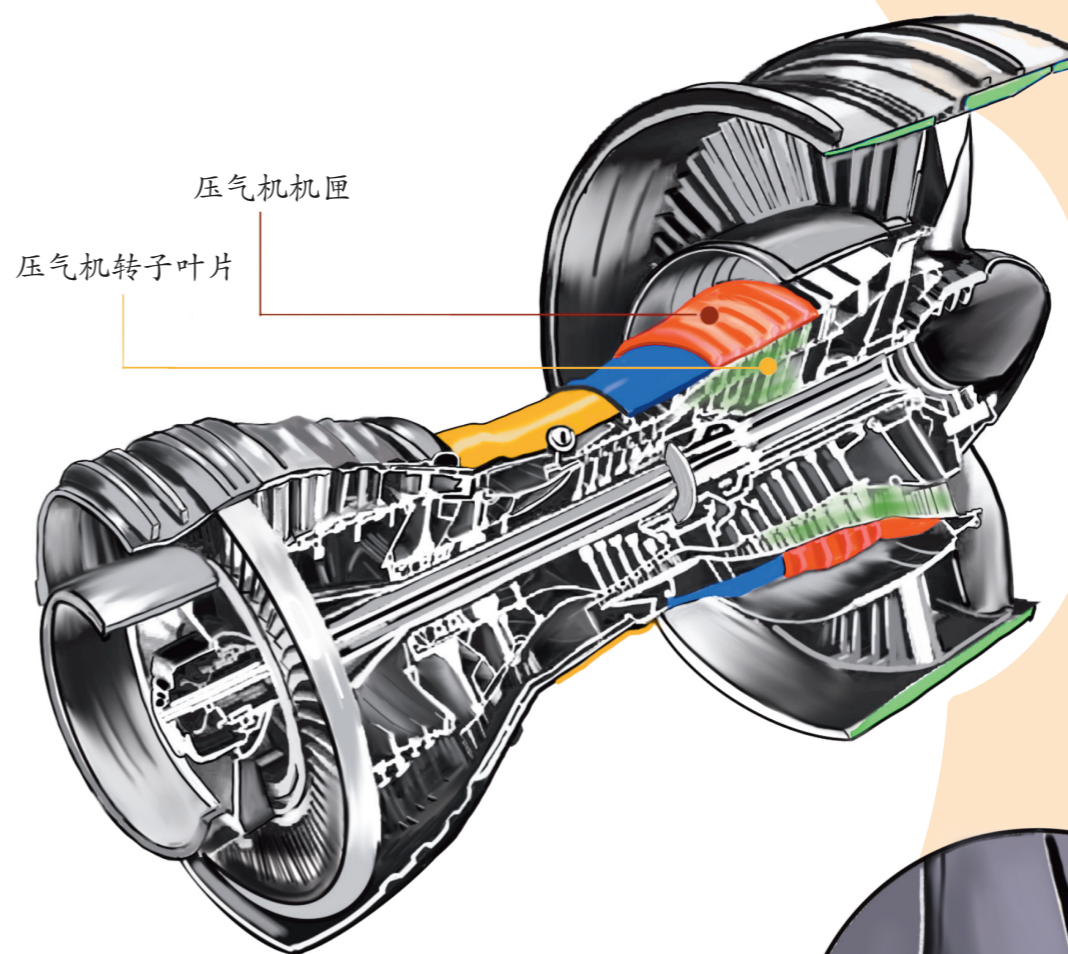
为了让气流更顺畅，航空发动机的绝大多数零件都具有复杂的流线型和曲面形状，有些还处于视觉盲区，眼睛看不到，手也摸不着，只能靠精湛的工艺和先进的设备来制造和检测。



风扇叶片

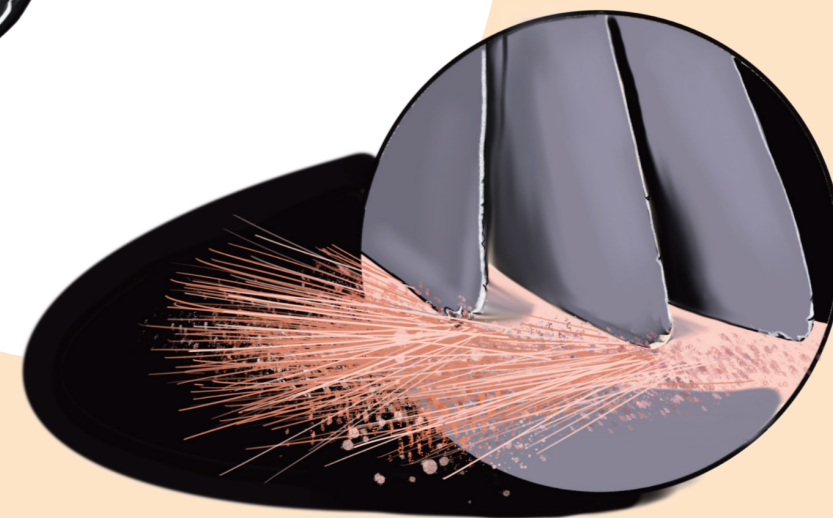
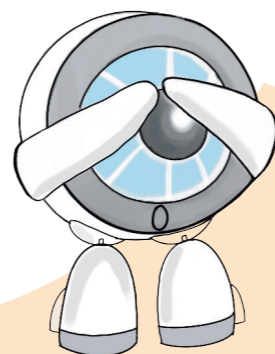


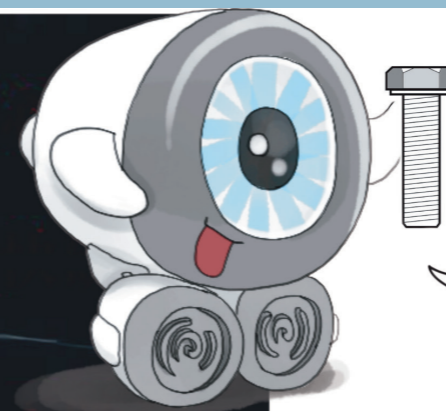
当压气机转子高速旋转时，转子叶片会像游乐场中的飞椅一样被甩开，转子叶片和机匣间的距离远了就会漏气，近了就会碰撞。这极其考验机匣的圆度、热变形、转子叶片的精度以及转子叶片和机匣间的配合精度。



压气机机匣

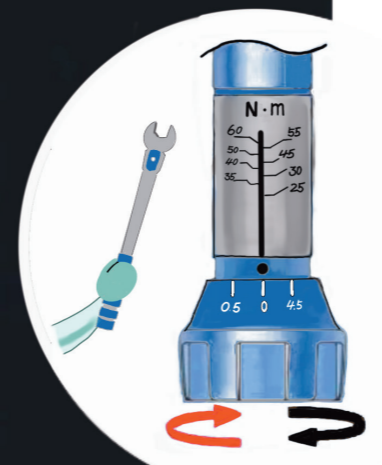
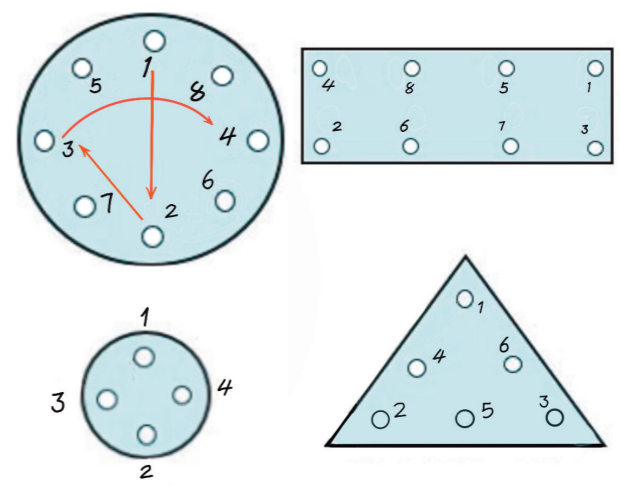
压气机转子叶片





小朋友们，
要注意螺栓拧紧的顺序！

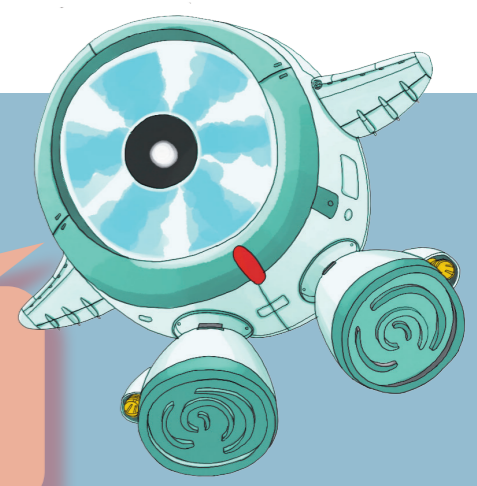
螺栓拧紧顺序是有明确要求的，不能绕圈一个一个拧，必须按对角线十字交叉拧紧。在航空发动机外部的一些螺栓拧紧后还要用保险丝锁紧。如果螺栓拧得不均匀，连接的两个零件就会变形，造成整机振动。



每颗螺栓更是要严格按照规定的力矩和顺序拧紧。把螺栓拧到拧不动可不是一种稳定的连接，应先按照一定的力矩拧紧，然后松开几圈，最后按规定的力矩拧紧。这种拧螺栓的方式主要是释放应力，确保航空发动机长时间工作时不会有零件松动。

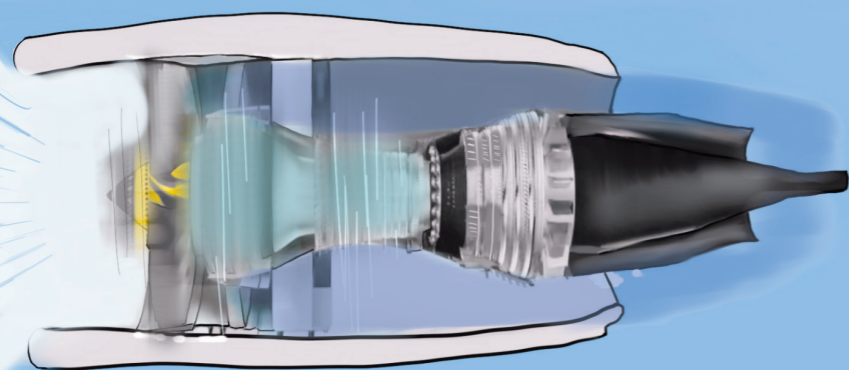
如果把航空发动机比作人体，机匣就是骨骼，管路就是神经和血脉，装配工艺直接决定了整机的工作效率和质量。

整机振动，这可是一个世界性的难题哟。

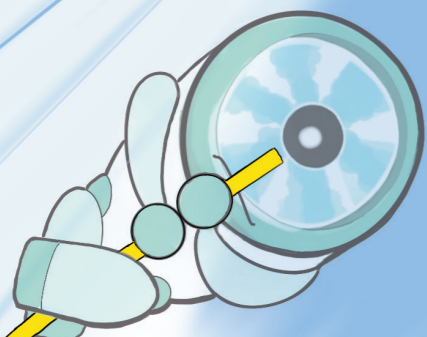


试验：过程控制极其严

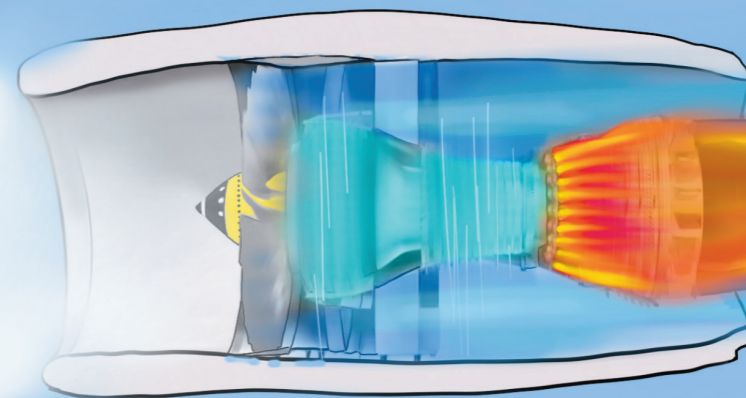
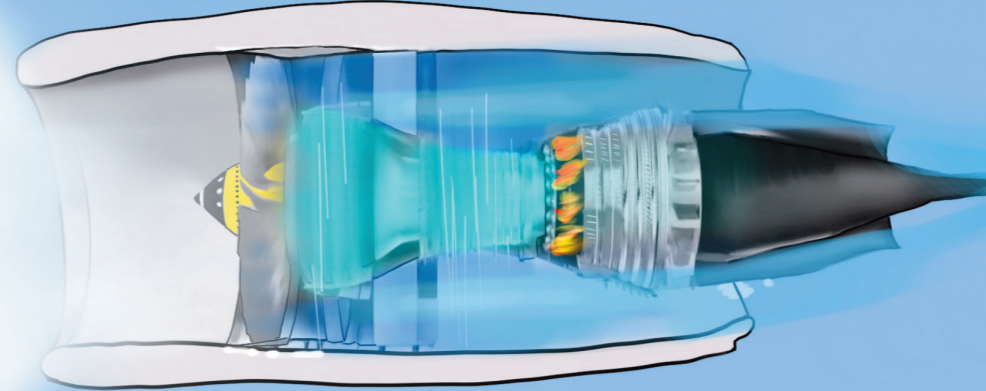
航空发动机的零件试验总时长超过一百万小时，是所有旋转机械中试验时间最长的，有的零件试验需要连续做几年。

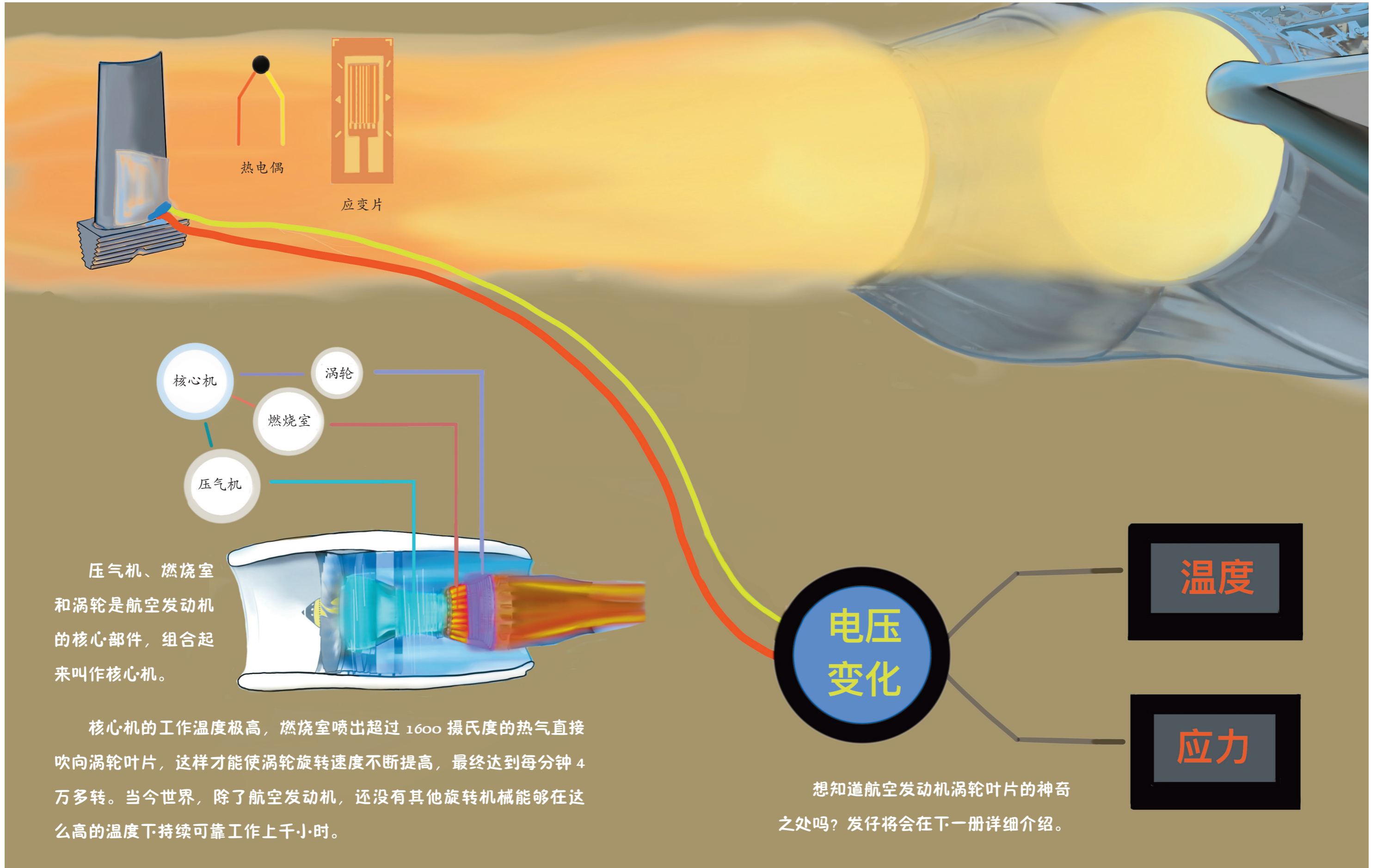


测量压气机“增压比”是部件试验的重头戏。当压气机转子转速达到每分钟4万多转时，可以把一个大型体育馆的空气压缩到一个小火柴盒子之中。压气机前后气压的比值就叫作“增压比”，“增压比”越高说明压气机技术越先进。



燃烧室试验是在3倍于17级台风速度的极端气流条件下实现稳定点火的试验，如同在飓风中点燃一根火柴，还要保持火焰的稳定。

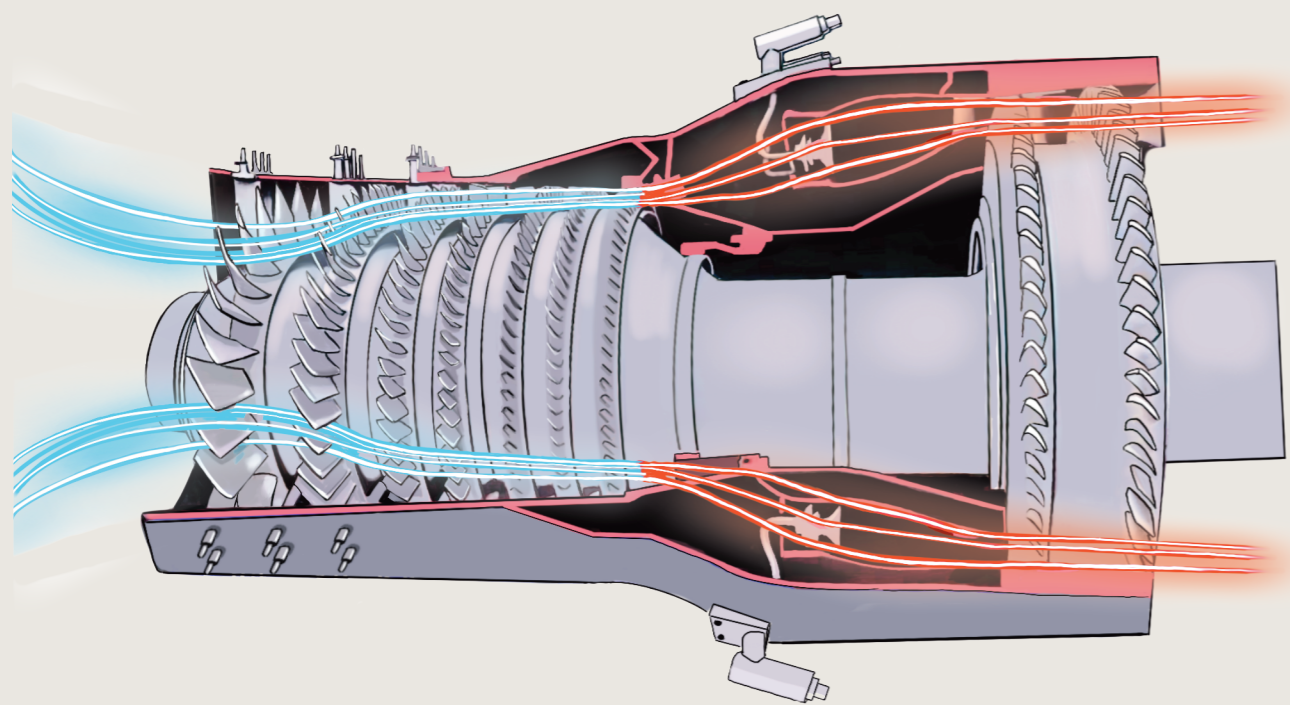




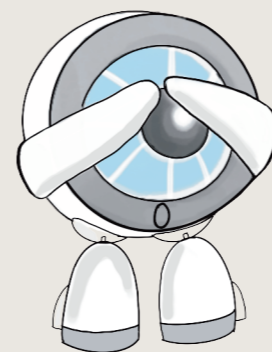
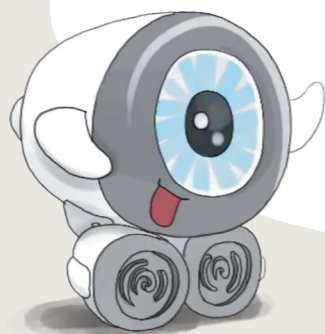
压气机、燃烧室和涡轮是航空发动机的核心部件，组合起来叫作核心机。

核心机的工作温度极高，燃烧室喷出超过 1600 摄氏度的热气直接吹向涡轮叶片，这样才能使涡轮旋转速度不断提高，最终达到每分钟 4 万多转。当今世界，除了航空发动机，还没有其他旋转机械能够在这么高的温度下持续可靠工作上千小时。

想知道航空发动机涡轮叶片的神奇之处吗？发仔将会在下一册详细介绍。

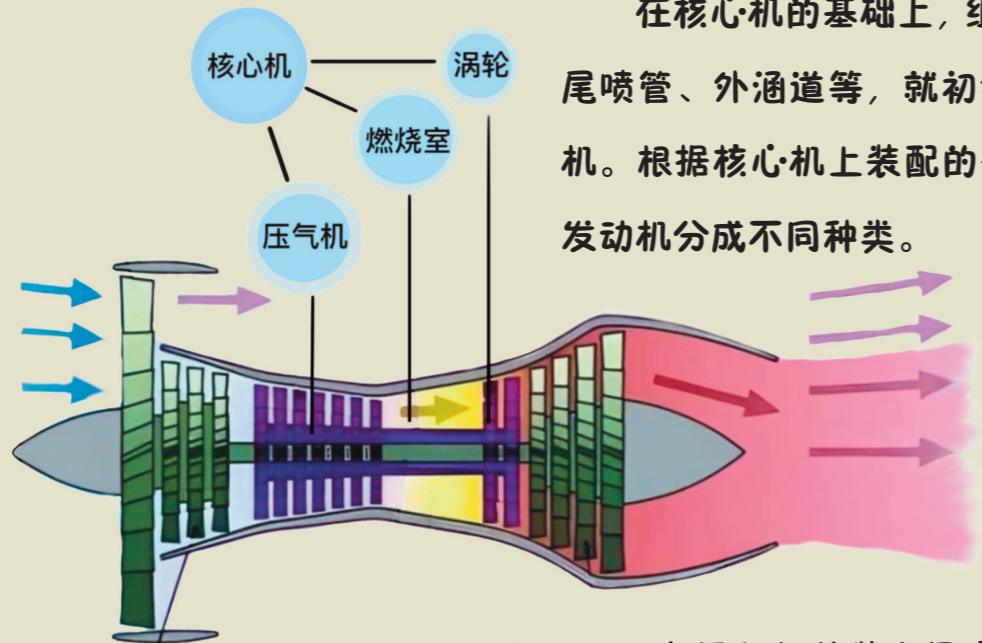


核心机必须精心协调压气机、燃烧室和涡轮这三大部件的性能，一旦进气量不足或者排气不顺畅，核心机就会“上气不接下气”，就像人“咳嗽”一样产生“喘振”。对航空发动机来讲，“喘振”的危害极大。

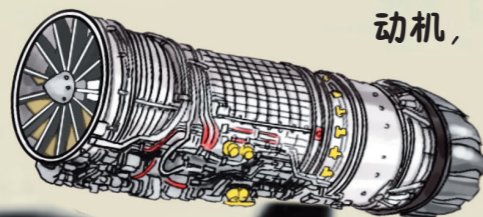


“喘振”，也是一个世界性的难题哟。

在核心机的基础上，组装低压部件、尾喷管、外涵道等，就初步形成了验证机。根据核心机上装配的部件，可以把发动机分成不同种类。



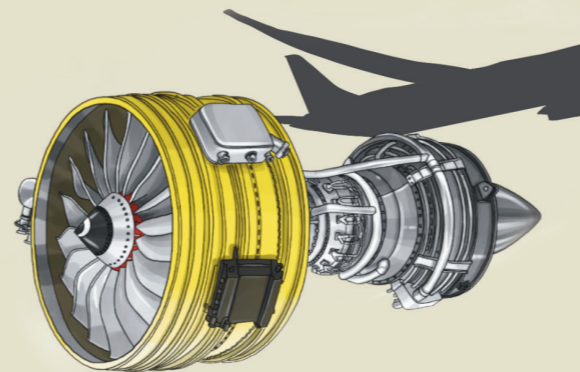
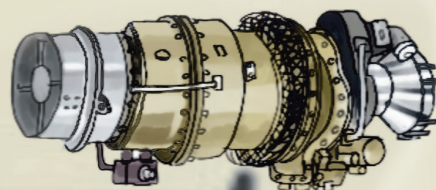
——在压气机前装有风扇的发动机，被称为涡扇发动机。



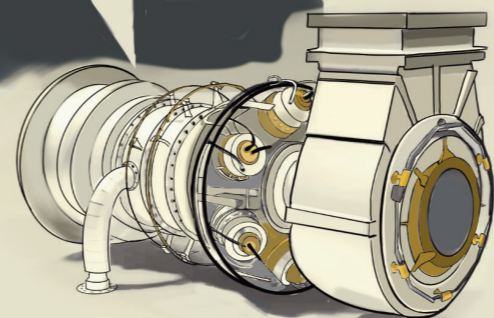
——动力涡轮带动螺旋桨的发动机，被称为涡桨发动机。



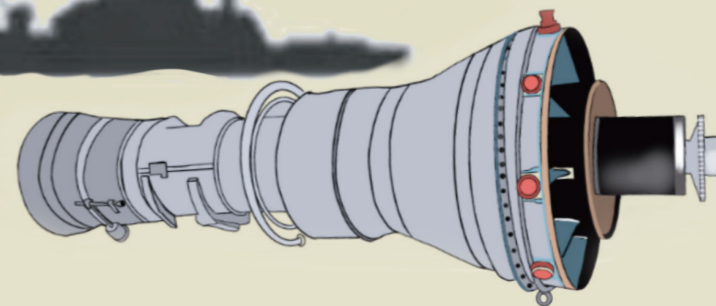
——动力涡轮带动直升机旋翼的发动机，被称为涡轴发动机。

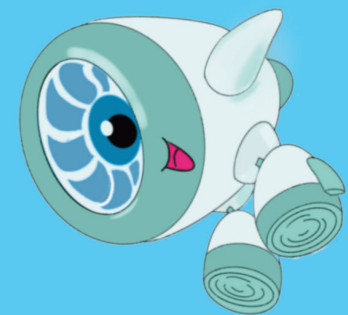


——涡轮带动发电机或油泵的发动机，被称为工业用燃气轮机，它为地面电站或泵站提供动力。



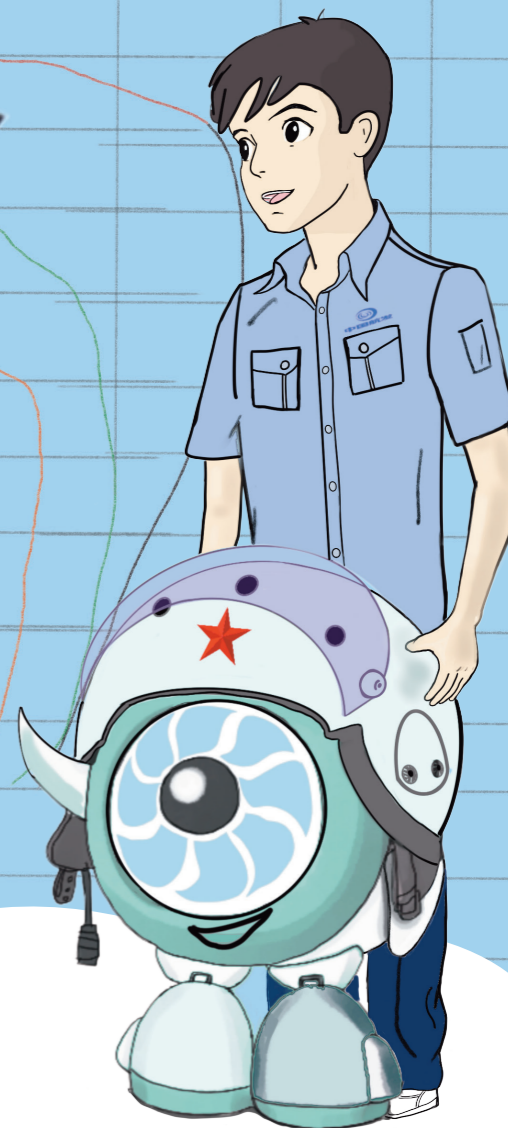
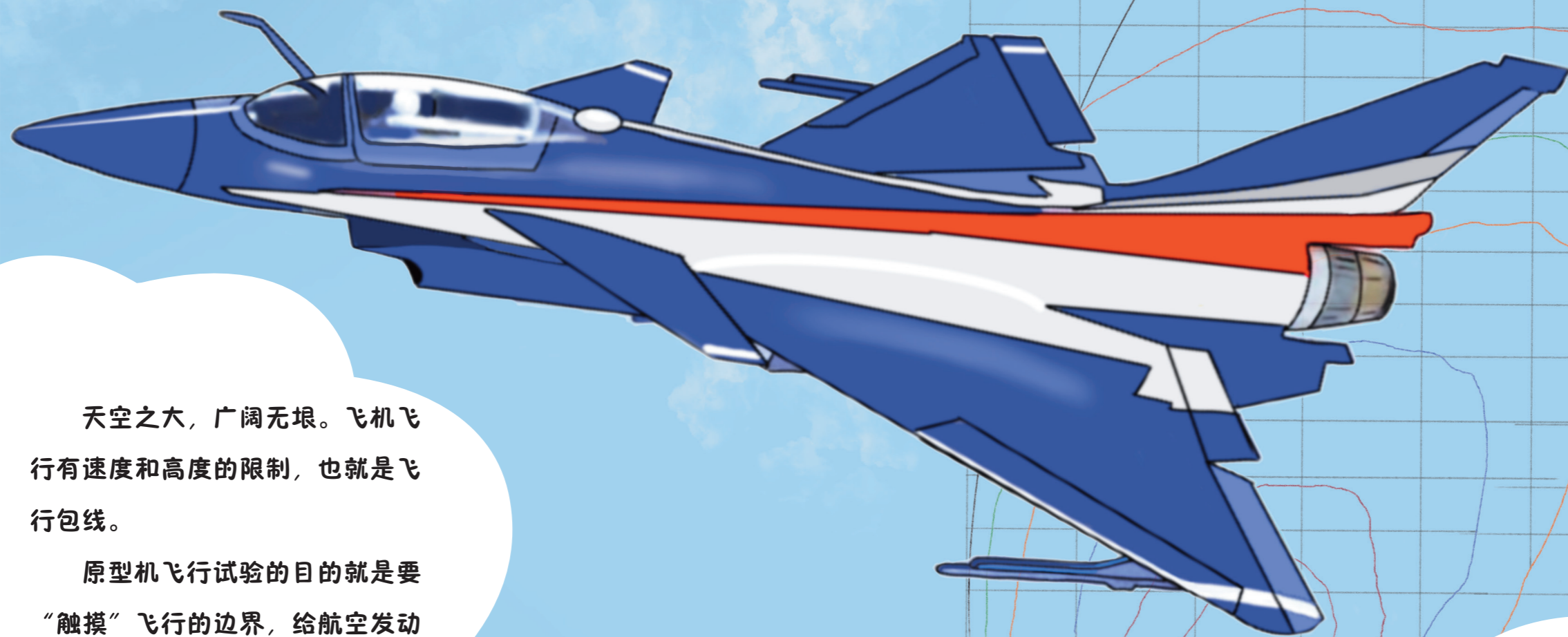
——涡轮带动舰船螺旋桨的发动机，被称为船用燃气轮机。





在第十二届中国国际航空航天博览会上，我国自主研发的歼-10B 推力矢量验证机成功展示了“眼镜蛇机动”等难度极高的飞行动作，充分展示了我国新型航空发动机的优异性能。

这些飞行动作极易导致航空发动机“呼吸不畅”，引起“喘振”或整机振动异常。但中国航发科技人员通过不懈努力，攻克了这两个世界性难题，也验证了我国在新技术、新材料、新工艺研究方面取得的成果。



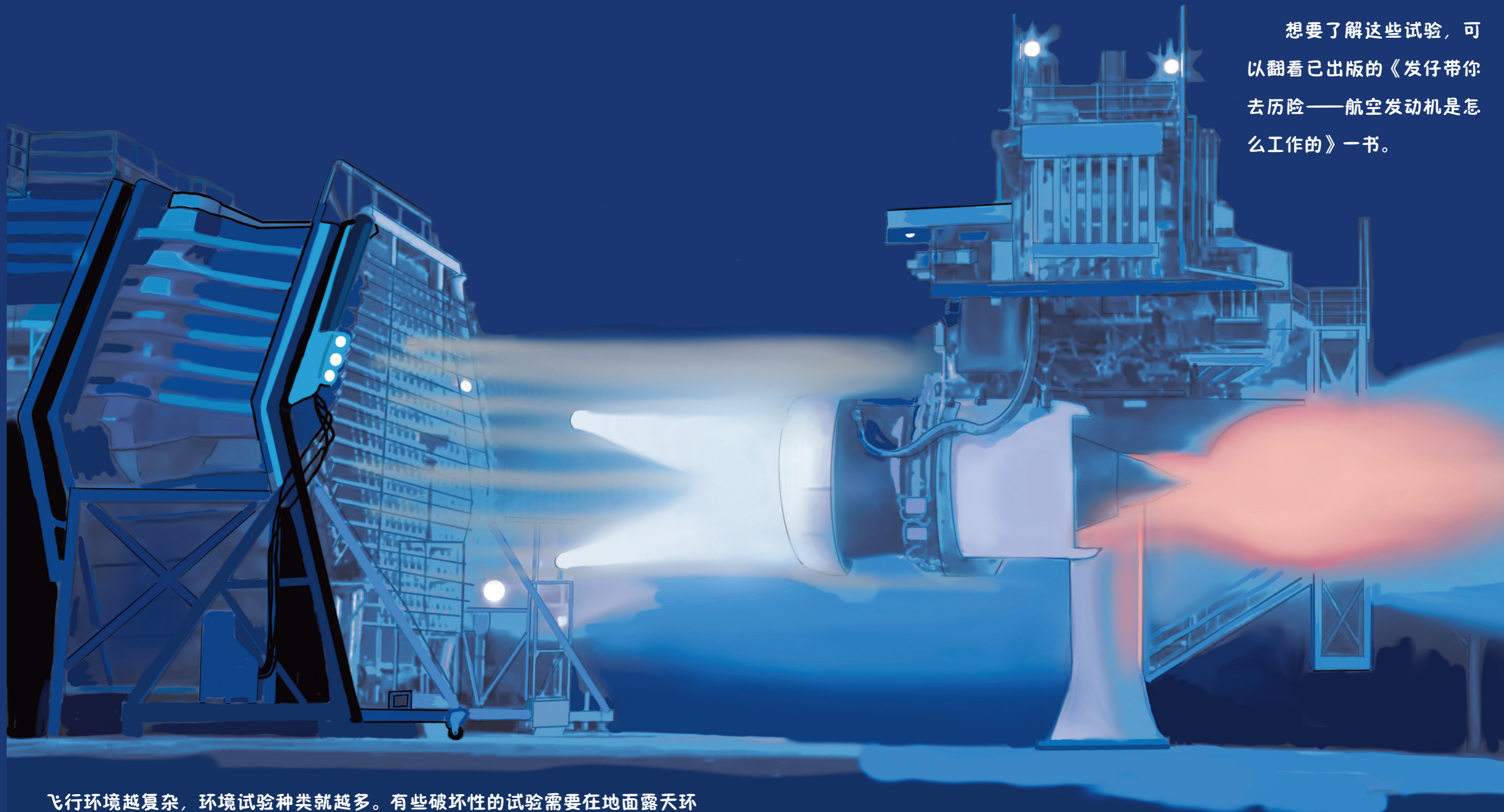
天空之大，广阔无垠。飞机飞行有速度和高度的限制，也就是飞行包线。

原型机飞行试验的目的就是要“触摸”飞行的边界，给航空发动机画一道红线。

“低空大表速”试飞就是要在飞机不解体的前提下，测试出“贴地飞行”的最大速度。在这种飞行状态下，地面的砂石很容易被吸入航空发动机中，造成像被炮弹击中一样的危害性后果。

“空中起动”试飞需要在空中飞行时先将航空发动机关闭，再在飞机急速下落时尝试重启航空发动机，一旦失败，飞行员只能迫降甚至跳伞逃生。

像这类风险极高的试验还有很多，原型机试飞时长达数千小时，飞行距离相当于绕地球赤道上百圈。



想要了解这些试验，可以翻看已出版的《发仔带你去历险——航空发动机是怎么工作的》一书。

飞行环境越复杂，环境试验种类就越多。有些破坏性的试验需要在地面露天环境中进行。例如，吞鸟试验、吞冰试验、吞砂试验、吞水试验、吞入火药气体试验等都需要在航空发动机露天试车台进行，让航空发动机尝遍“酸甜苦辣”的滋味。

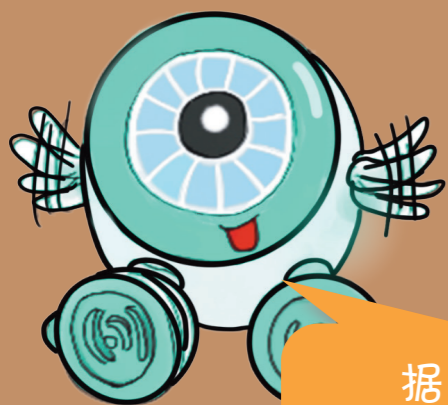
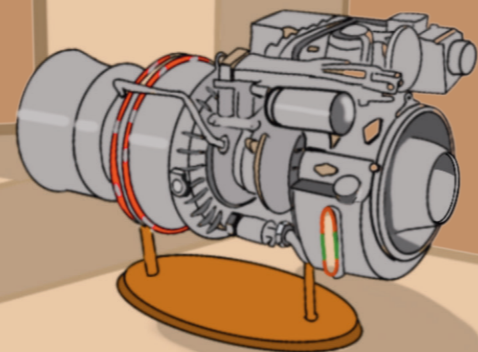
适航：安全要求极其细



AES100
型号合格证

适航条例

航空发动机
审定



据有关组织对某段时间所发生的伤亡事故的比较研究，坐飞机比坐汽车安全 22 倍。

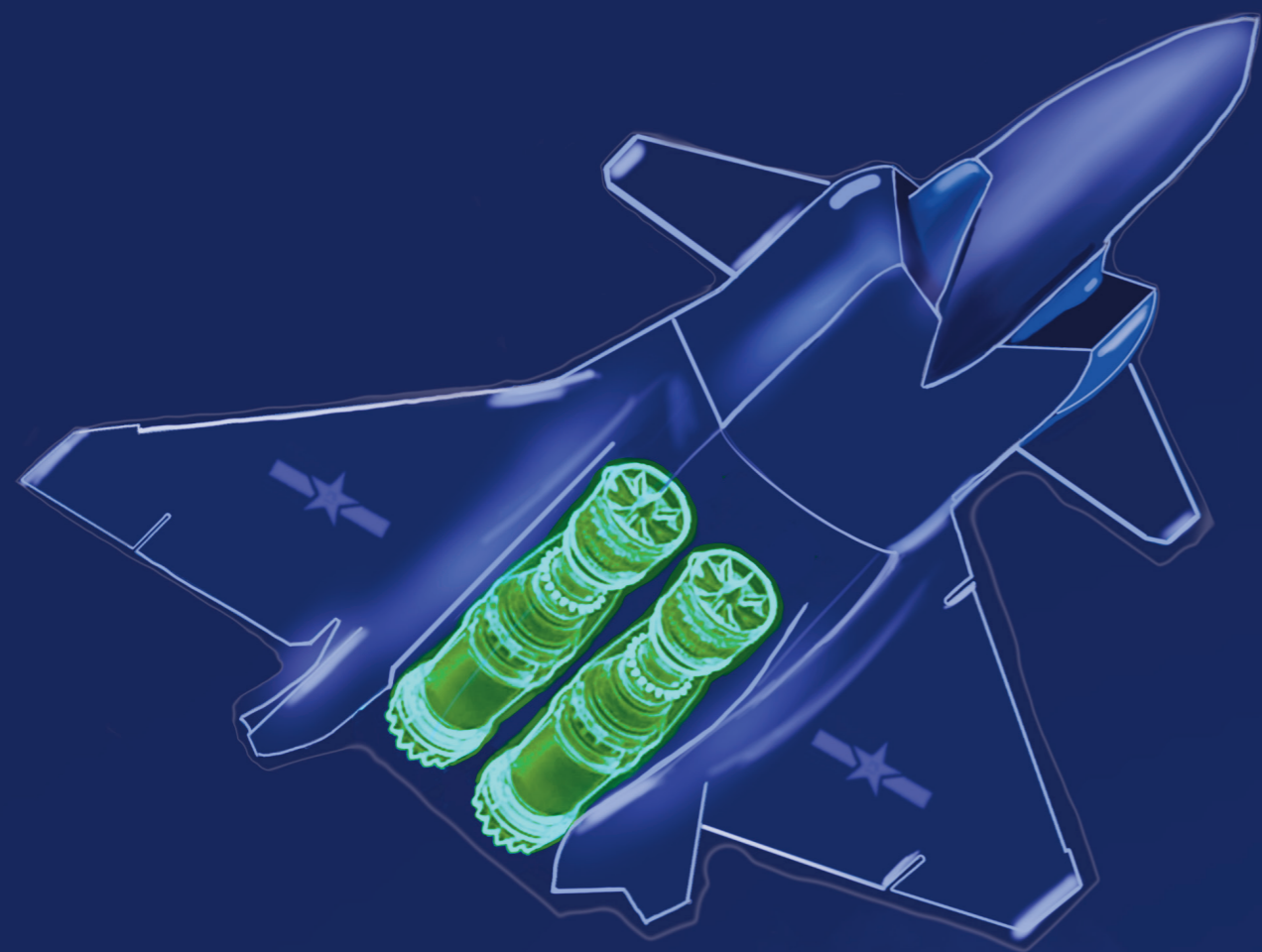


取得型号合格证和生产许可证是通过适航审查的标志，意味着航空发动机的安全水平达到了每百万飞行小时中发生机毁人亡事故的概率小于一次，只有这样才能进入民航市场。

适航规章的宗旨是保障飞行安全，《航空发动机审定》这一规范性文件就有 450 多页，覆盖了设计、生产、使用和维修全过程。

叶片飞脱是适航试验中风险最大的项目。当航空发动机处于最大转速时，把最大的一个叶片从根部断开，飞出的叶片像炮弹一样砸向机匣，破坏力如同航空发动机内部发生爆炸。

适航规章要求机匣既能包住叶片、不被打穿，又要保证不着火，最大限度保证乘客和飞机的安全。



无论是在繁忙的航线上，还是在保卫祖国的辽阔天空时，航空发动机作为飞机的“心脏”永远跳动不止。

强劲动力“中国心”！

