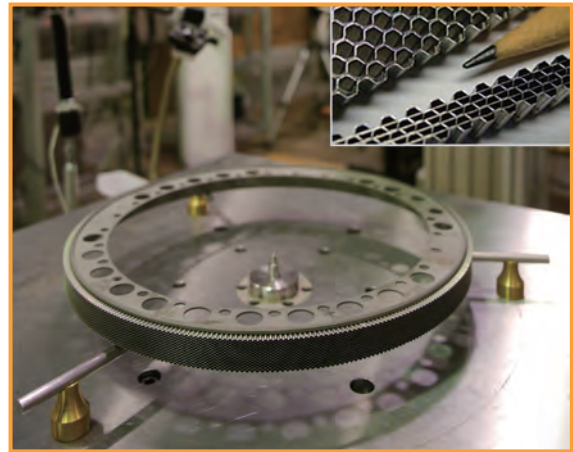


## 蜂窝密封 — 提升航空发动机的工作效率

一架飞机的耗油量到底有多大？举个例子，波音747飞机的耗油量约为每公里12升，从香港飞往伦敦就消耗了共116,000升（98吨）汽油，耗油量可谓十分惊人！为了节省高昂的燃料成本，工程界发明了蜂窝密封环 (Honeycomb Seal Ring)，它是一种在航空业被广泛使用的零部件，能有效提升发动机的工作效率。测量这种带有蜂窝结构的密封环是业界面临的新挑战。坐落在亚太区中心、以香港为基地的HAESL — 香港航空发动机维修服务有限公司成功地解决了这一难题；其新型SRMS (Seal Ring Measurement System) 光学蜂窝密封环检测系统，通过



蜂窝密封环

使用雷尼绍高性能TONiC™系列直线光栅和圆光栅，提供精准和可靠的位置反馈。



HAESL发动机维修车间

刘健华先生是一名资深工程师，在HAESL服务近20年；SRMS是HAESL和香港理工大学 (PolyU) 共同开发的系统，它彻底改变了业界测量蜂窝密封环的方式。以前HAESL采用游标卡尺进行人工检测，人工检测不但费时，而且十分依赖检测员的技术和经验，使用SRMS系统后，不仅检测效率提升了50%，而且减少了人为误差，使结果更加一致。

### 蜂窝密封环

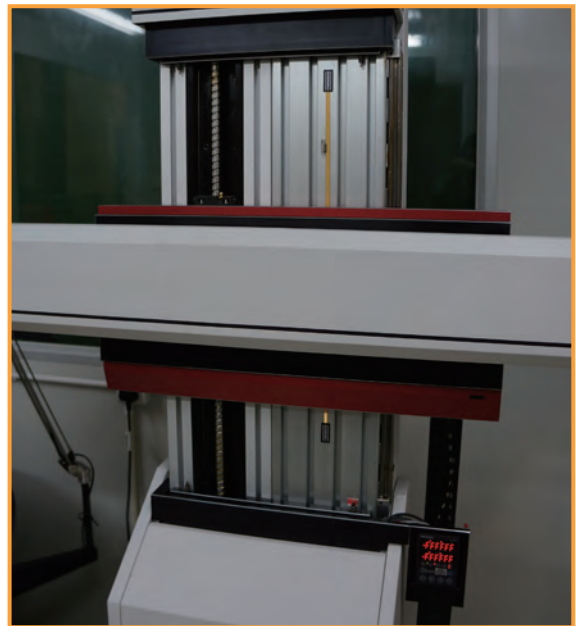
蜂窝密封环安装在发动机内壁上围绕轴中心的环型槽中，主要用于密封旋转叶片和发动机内壁之间的径向间隙，减少漏气，从而提升发动机工作效率，降低耗油量。飞机在高空飞行中，发动机材料因温度上升而膨胀，蜂窝密封环正好起到保护作用：它可提供一个可磨损层，保证叶片不会与发动机内壁产生磨擦而发生危险。密封上的蜂窝群孔尺寸取决于旋转叶片大小，其直径从0.8 mm到3 mm不等，深度达13 mm。

### 表现可靠

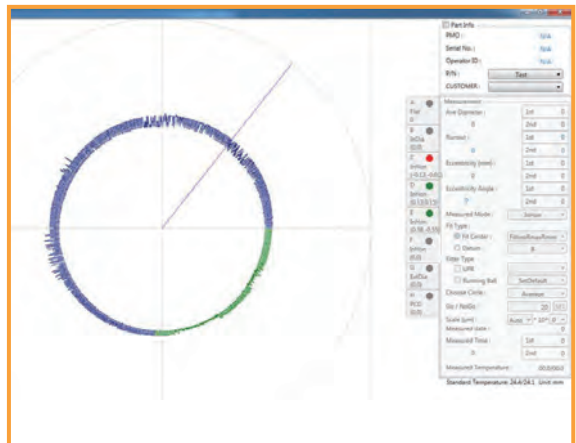
SRMS系统的总设计师吴逸钊先生解释道：“集成光学测头、滚轴丝杆、伺服电机和转台组成了一个高精度、可靠和免维护的检测系统。跟传统测头系统不同，SRMS采用非接触式光学检测技术，能有效解决在测量蜂窝密封环时最常碰到的问题。选择雷尼绍源于我们对其产品的信任，过去成功的合作项目使我们对雷尼绍光栅有深入的了解，知道雷尼绍无论是产品品质还是性能都十分有保障。雷尼绍TONiC光栅系列具有一流抗污能力，读数头设计紧凑并且安装简便，在系统设计上给予我们充分的灵活性。我们把两组TONiC光栅分别安装到SRMS系统XY平台的直线轴上，有赖雷尼绍的全力支持，SRMS系统的性能得以充分发挥。”



SRMS光学蜂窝密封环检测系统



TONiC在光学蜂窝密封环检测系统上的应用



控制软件

吴先生继续说：“用于放置密封环的转台的定位系统，对检测结果有着决定性的影响。我们对比了几个不同品牌的光栅，发现雷尼绍光栅有很高的性价比。为了确保转台在运行时的流畅度和稳定性，光栅必须提供低细分误差，在这方面TONiC无疑表现突出。”雷尼绍TONiC RESM圆光栅系统提供 $\pm 30$  nm超低细分误差，分辨率达86.4M CPR，足以满足众多高端工业应用要求。圆光栅低质量与低转动惯量的设计增强了系统精度和动态性能，加上读数头采用低噪声（抖动）光学滤波系统，进一步提高了位置控制的稳定性。

### 安装简便

所有雷尼绍的圆光栅均采用锥面安装方式，能有效减低安装误差并简化系统集成。吴先生说：“锥面安装方式是雷尼绍编码器的一大特点，能够大大减少我们用于纠正轴偏心所花的时间和人工成本。”另外，每一个雷尼绍读数头上均配有LED安装指示灯，因此无需再使用示波器及其他复杂的安装辅助装置，从而可大大加快安装速度。

### 创新设计

SRMS是一套高精密光学检测系统，操作员可通过控制面板选择所需要的检测项目，包括蜂窝密封环的圆度、平坦度和PCD (Pitch Circle Diameter) 孔直径（用于安装）。系统主要由3个模块组成：转台、主控台与集成光学测头和软件控制台。

吴先生解释SRMS的工作原理：“集成光学测头内置高精度3R级激光位移感应器和工业用摄像头，在主控台的XY平台上直线移动。激光位移感应器用于测量密封环的外径

和内径，摄像头则用于采集PCD孔影像和远程监视LDS激光点的位置。利用光学技术使检测精度得到明显提高，这是传统接触式测头无法提供的。”

在检测过程中，操作员首先要把蜂窝密封环放置在转台上。通过软件上的自动校正中心功能，放置误差可小于 $\pm 2$  mm。从资料库中选取密封环型号后，就可以开始进行测量。测头会停在预先编程的位置，采集在旋转过程中蜂窝密封环与测头之间的位移数据。采集的每个点的数据都会与雷尼绍TONiC圆光栅提供的相应角度位置数据一同发送到软件进行分析和计算，从而得出检测结果。

### 提升机床稳定性

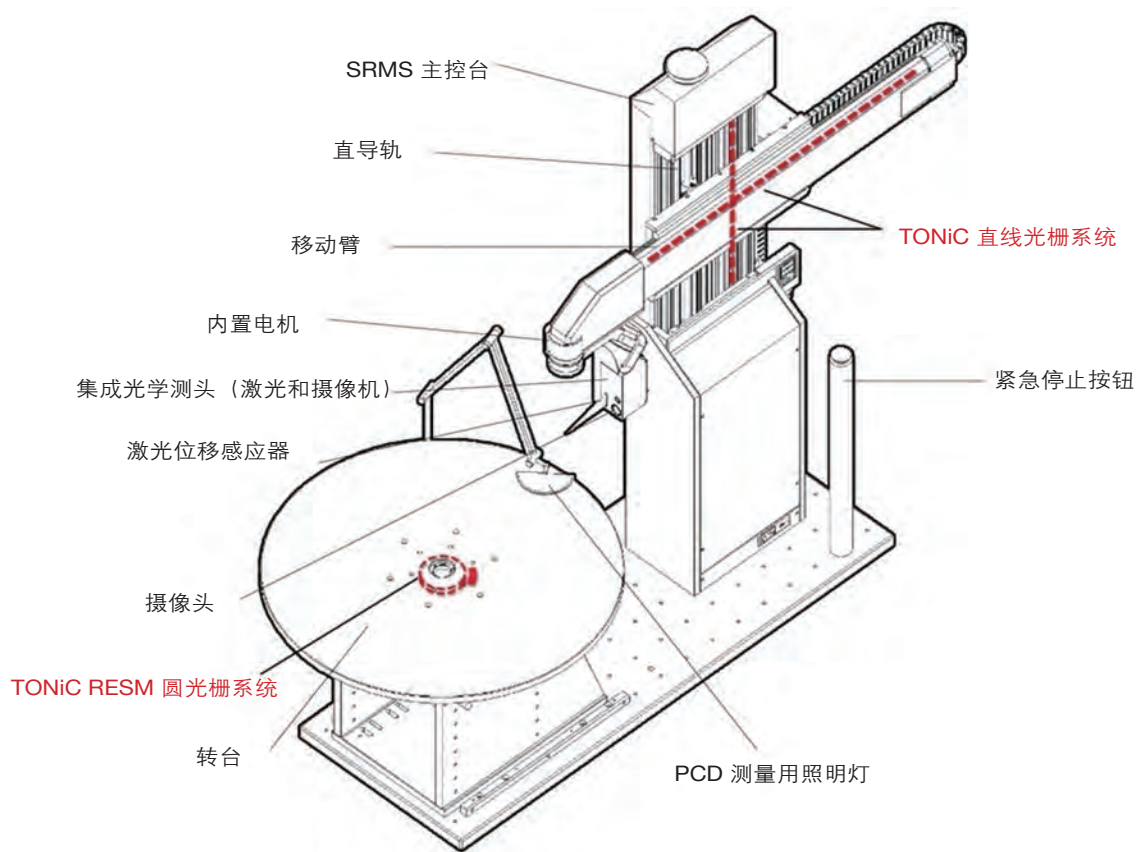
除了雷尼绍的光栅外，HAESL也使用了雷尼绍QC10球杆仪系统对机床性能进行基准测试与追踪。QC10球杆仪系统能快速诊断出机床存在的问题和产生这些问题的误差源，使用户能提前做出预防性维护，从而减少因故障停产所浪费的时间并提升工件的良品率。刘先生说：“我们目前正积极考虑将现有的QC10球杆仪系统升级到雷尼绍最新的QC20-W系列，新系统具有更强大的功能，如蓝牙无线传输技术、‘部分圆弧’测试以及3个平面测试的一次性设定。”

HAESL的坐标测量机也使用了雷尼绍TP200触发式测头，配置PH10机动测座进行零件检测。刘先生说：“检测是航空业中一道不可或缺的程序，雷尼绍在坐标测量机测头领域处于全球领先地位，毫无疑问是我们的第一选择。”

## 关于HAESL

香港航空发动机维修服务有限公司 (HAESL) 是一家合资公司，由罗尔斯·罗伊斯股份有限公司 (Rolls Royce Plc)、香港飞机工程有限公司 (HAECO) 和新加坡国际航空工程有限公司 (SIAEC) 联合组建。总部设于香港，为众多世界知名航空公司旗下的波音和空中客车飞机提供罗尔

斯·罗伊斯发动机专业维修、翻新及零部件维修服务，在行业内拥有超过35年经验，已成为全球业界最为知名的品牌之一，提供最高品质、最为全面的发动机维修服务。自2002年以来，HAESL与香港理工大学紧密合作，共同开发新项目并专门设计一些培训课程供航空从业人员作技术更新。



光学蜂窝密封环检测系统结构