

文章编号: 1000-8055(2024)12-20220982-09

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220982

涡轴发动机测扭装置发展现状及趋势

李立新^{1,2}, 廖明夫¹, 余索远², 刘 森¹, 周春丽²

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072;

2. 中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘 要: 为进一步研究涡轴发动机测扭装置, 研究了常见测扭装置的分类、优缺点及其在涡轴发动机中的适用性。阐述了常用的涡轴发动机扭矩测量装置的基本原理、发展现状及典型应用案例, 并指出了目前存在的主要问题, 进一步分析了制约紧凑型动力涡轮转角法测扭的核心技术难点。探讨了采用温度补偿、扭转角度转换成轴向位移, 以及将动力涡轮短粗轴由圆柱/圆环截面改进成星形截面等结构在提高测扭精度的可行性。研究发现: 星形截面轴可保证足够抗弯刚度的前提下显著降低扭转刚度, 可解决紧凑型大功率涡轴发动机测扭装置精度不高的问题, 应着力研究星形截面轴弯曲、扭转振动特性和开展装机适应性验证。

关 键 词: 涡轴发动机; 星形结构; 转角法测扭; 温度补偿; 角度转成位移

中图分类号: V232.2

文献标志码: A

Current situation and development trend of torque measuring device for turboshaft engine

LI Lixin^{1,2}, LIAO Mingfu¹, YU Suoyuan², LIU Sen¹, ZHOU Chunli²

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Hunan Aviation Powerplant Research Institute,
Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China)

Abstract: To further study the torque measuring device of turboshaft engine, the classification, pros and cons of common torque measuring devices and their applicability in turboshaft engine were studied. The basic principle, state-of-the-art, typical application cases and main problems of torque measuring devices commonly used in turboshaft engines were elaborated, and then the core technologies of torque measurement for compact power turbine angle method were analyzed. The feasibility of improving the accuracy of torque measurement methods involving both the structures of changing temperature compensation and torsion angle into axial displacements and the new star-type section structures of the short and thick shaft of power turbine improved from the cylinder/ring section was discussed. From this investigation, it was demonstrated that the star-type section shafts could guarantee to obviously reduce the torsional stiffness under the premise of enough flexural rigidity, so that the precision of torque measuring device of compact high-power turboshaft engine can be improved. The efforts of this study provide the research directions of torque measuring devices for turboshaft engine involving the bend and torsional vibration characteristics of star-type section shafts and the validation of installation adaptability.

Keywords: turboshaft engine; star shape structure; angle-based torque measurement method; temperature compensation; angle-displacement convertor

收稿日期: 2022-12-26

基金项目: 国家科技重大专项(2017-IV-0001-0038)

作者简介: 李立新(1981—), 男, 研究员, 博士生, 主要从事航空发动机总体设计研究。E-mail: myassist@qq.com

引用格式: 李立新, 廖明夫, 余索远, 等. 涡轴发动机测扭装置发展现状及趋势[J]. 航空动力学报, 2024, 39(12): 20220982. LI Lixin, LIAO Mingfu, YU Suoyuan, et al. Current situation and development trend of torque measuring device for turboshaft engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(12): 20220982.

扭矩是传动系统的重要参数,通常采用测扭装置和匹配的扭矩传感器进行测量。其基本原理是通过测扭装置将传动系统的扭矩转换为可供测试系统采集的电信号,通过匹配的算法在线实时计算扭矩,进而实现扭矩的测量。扭矩测量是评价动力装置(包括航空动力^[1-3]、航天动力^[4]、铁路运输^[5]、汽车动力^[6-7]、舰船动力^[8]、钻井动力^[9]、医疗设备动力^[10-11]、机器人^[12]和电动机^[13-14])性能、计算输出轴功率、保护输出轴^[15-16]、提高动力装置机械效率及提升瞬态响应品质^[17-19]的重要手段。

涡轴发动机是直升机的主动力装置,其产生的轴功率来自动力涡轮轴轴功,通过直升机上的主减速器来驱动直升机的旋翼和尾桨。动力涡轮轴转速是发动机最重要的控制目标参数之一,动力涡轮轴扭矩将传送至直升机用作飞行员监视直升机主减速器承受的分扭矩及总扭矩。这两个参数(分扭矩及总扭矩)可反映涡轴发动机工作状态,并用于评价涡轴发动机性能,验证是否可以满足中国民用航空规章、美国联邦航空管理局和欧洲航空安全局等适航管理部门建立的发动机扭矩特性适航规章^[20],或军方对发动机全包线范围内扭矩测量精度的要求。鉴于扭矩参数可用于双发或多发扭矩配平,避免发动机长期运行状态相差过大而对传动装置造成危害,以提升直升机性能并保护其传动系统^[21]。因此成为直升机变旋翼转速的最重要控制参数^[22]。测扭装置设计技术是提高涡轴发动机扭矩测量精度的关键,本文从测扭装置分类其在涡轴发动机上的适用性、典型涡轴发动机测扭装置等方面进行系统分析,并且对转角法测扭装置设计技术的发展方向进行展望。

1 测扭装置的分类及其在涡轴发动机上的适用性分析

目前,扭矩传感器的种类很多,根据其工作原

理,可归纳为 3 大类。第 1 类基于剪应力,利用应变片测量传动轴的剪应力计算扭矩,主要包括:应变片+滑环、声表面波、逆磁致伸缩、压电式等形式^[23-24]。第 2 类基于扭转变形,利用扭转轴两端的转角差,通过测量传动轴的扭转变形计算扭矩,主要包括:磁电式、光电式、激光式、电容式和电感式等形式^[25-29]。第 3 类基于反力矩,利用测量装置的支座进行输出轴的反力矩测量扭矩,常见的有:水力测功器,扭力扳手、静态扭矩实验测量装置和具有测扭功能的减速器机构^[30]等。

按照转/静子是否接触划分,扭矩测量分为非接触式测量和接触式测量两大类。①接触式,包括应变片+滑环(用于低速、或高速短时间扭矩测量)等形式;②非接触式,主要包括电磁式、声表面波式、光电式、电容式和电感式等形式^[31-33]。

尽管现有的各种类型扭矩传感器具备各自优点,然而也存在着一些明显的缺点或使用条件限制,例如:对于基于剪应力的扭矩传感器,温度、黏接剂、滑环磨损等因素影响测量精度,并且抗干扰能力有待改进;对于基于扭转变形的扭矩传感器,磁电式的响应速度欠佳、动态特性较差,需要较大的扭转角度;对于光电式传感器,不适于起动和低转速等工况;电容式,不适于大尺寸转轴;对于基于反作用力的扭矩传感器,通常只适用于台架动态测试、静态加载试验等,不适于外场动态扭矩的测量。

涡轴发动机动力涡轮轴周边处于高温(如 200 ℃)、高转速(如 20 900 r/min)、高振动应力、存在滑油油雾环境和轴承不允许接触磁性零件等非常苛刻的工作环境,军用发动机还处于强电磁干扰工作环境。因此,这要求涡轴发动机测扭装置必须完全适应这些工况,并可在零件组装时进行标定。然而,这严重限制了大多数常见测扭装置在涡轴发动机中的应用,典型测扭技术在涡轴发动机中的适用性分析见表 1。

表 1 典型测扭技术在涡轴发动机中的适用性分析
Table 1 Applicability analysis of typical torque measuring techniques in turboshaft engine

测扭装置分类	典型技术特征	适用情况
声表面波式	将雷达技术与无线声表面波技术相结合。	胶黏不适用高速轴。不适用。
逆磁致伸缩式	轴具有磁性。	轴承不允许接触磁性结构件。不适用。
压电式	需要滑环引电器。	滑环+应变片均不适用高速轴。不适用。
磁电式	利用轴的扭角测扭。	涡轴发动机常用。
光电式	需要光学系统,常用在直升机上测发动机输出扭矩。	静标困难,抗干扰能力差,一代、二代涡轴发动机使用。

续表		
测扭装置分类	典型技术特征	适用情况
激光式	一种是利用光的衍射原理;另一种是利用测量激光与参考光束叠加形成多普勒差拍频率测扭。	需专用光源和电荷耦合器件图像传感器,但涡轴发动机无光学系统。不适用。
电容式	在轴上安装由不变电感和可变电容组成的振荡电路。	不适用涡轴发动机的油雾环境。
电感式	带有磁性元器件	容易受到温度的影响,加装温度补偿装置后,传感器的体积增大,不利于集成化。
振弦式	直接利用传动轴拉伸后固有频率变化测量;对轴的扭角要求高。	不适用高速轴。
光纤式	需无尘埃无气雾环境。	不适用涡轴发动机的油雾环境。

2 典型的涡轴发动机测扭装置/系统

为了准确地从涡轴发动机动力涡轮轴上测量扭矩,在涡轴发动机研制发展过程中,前期的研究人员已经开发出了多种扭矩测量装置,主要可以分为两大类:外置扭矩测量系统和内置测量系统/装置。

2.1 外置扭矩测量系统

外置扭矩测量系统,主要利用涡轴发动机外部的测试设备(如台架测功机,直升机联轴器测试改装测扭装置)进行测扭或进行涡轴发动机输出扭矩标定^[19, 25]。通常来说,该方法适用于研发过程,而难以在直升机上长期使用。

直升机测试改装时,会利用主减速器输入轴联轴器加装外置扭矩测量系统,如图 1 所示。该系统可在测扭的同时判断连接轴系的对中偏摆情况,从而使直升机具有更好的适用性^[34-35]。

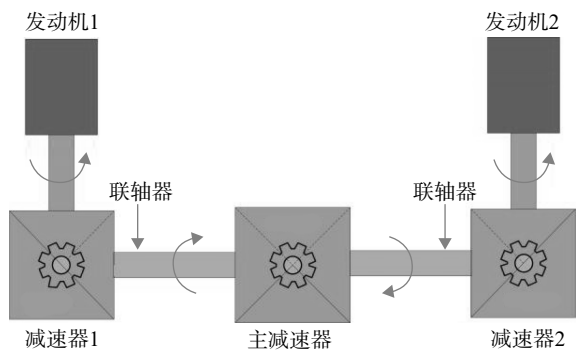


图 1 直升机并车及外置联轴器示意图
Fig. 1 Helicopter parallel and external coupling diagram

2.2 内置扭矩测量装置

内置扭矩测量装置,是指利用涡轴发动机本体的内部一组零件,辅以专用传感器,来测量涡轴发动机输出扭矩的一种结构件组合。按测量信号可以分为电阻应变信号、液体压力信号、气动参数信号、磁电脉冲信号、光电脉冲型号和差分电容信号这 6 类。

2.2.1 电阻应变片式测扭

电阻应变片的测试原理是:金属电阻会随着它所受的机械变形的大小而发生相应变化,这种现象被称为金属的电阻应变效应;将基于该效应而设计的专用测扭应变片胶接在被测弹性轴上,组成应变桥,即可将应变片感受到的弹性变形转换成电阻值的变化,这样就将被测物理量的变化转换成电信号的变化,再通过电桥电路及补偿电路输出电信号,最终实现微小应变量的电信号测量^[36-37]。

电阻应变片式测扭装置通常使用滑环引电器,如图 2 所示。但是,由于导电滑环属于磨擦接触,因此不可避免地存在着摩擦发热,因而限制了旋转轴的转速及导电滑环的使用寿命。此外,由于接触不可靠,可能引起信号波动,因而造成较大测量误差,甚至导致测量失败。

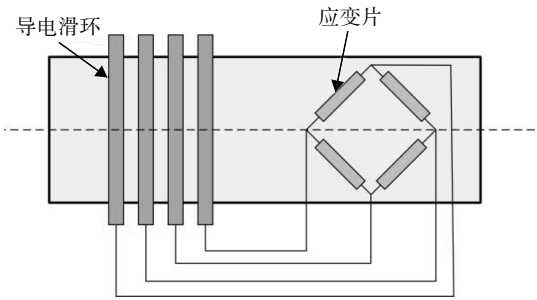


图 2 滑环引电测扭示意图
Fig. 2 Slip ring induced torque measurement diagram

鉴于常规的电阻应变片式测扭装置存在的问题,当前最新的研究方向是采用无线电遥测的方法,即将扭矩应变信号在旋转轴上放大并进行信号转换,通过载波调制无线电的方法将信号从旋转轴上发射至轴外的接收装置,就得到旋转轴受扭的信号。此外,还可进一步发展成为无线无源声表面波(SAW)技术,该技术目前已在汽车和坦克等低速轴^[38-39]以及涡桨发动机低转速(如 2 000 r/min)无油雾环境的联轴器上获得成功应用^[40]。

然而,当前在 SAW 传感器中的使用中,也存在难以精确控制各黏接剂的用量和分布,导致传感器之间存在差异以及标定装置精度不高等问题^[41]。

另外,由于应变片在高转速工况下的使用寿命短、可靠性较差且存在标定难度大^[42]等问题,目前还没有涡轴发动机型号上的应用实例,通常被用于在研制阶段的临时校验性测量。

2.2.2 液压转换式测扭

液压转换式(又称机械液压式)测扭的工作原理是:利用圆柱斜齿轮的力分解特性,即圆柱斜齿轮承受的扭矩除产生圆周切线方向的分力外,还会产生轴向分力。轴向分力可以通过液压活塞内的滑油压力进行平衡,通过压力传感器测量活塞内的滑油压力即可换算成扭矩。

液压转换式测扭装置不能进行静态标定,需要在台架试验时利用水力测功器进行标定。标定后,还需将滑油压力作为输入参数、水力测功器测到的功率作为输出结果拟合合成扭矩测量公式,才可用于涡轴发动机的扭矩测量。通常,该装置需要涡轴发动机自带测扭用的齿轮(体内减速器或专用测扭齿轮)。图 3 为液压测扭示例图。

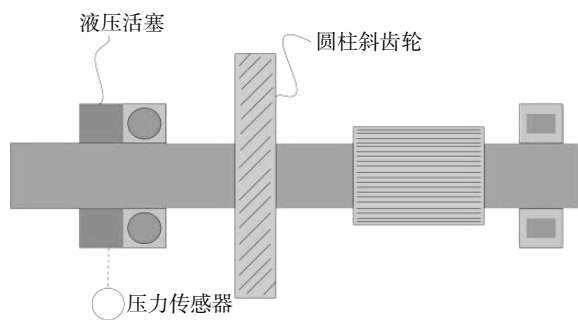


图 3 液压测扭示意图

Fig. 3 Hydraulic measuring torque diagram

该类测扭装置的典型应用案例有法国透博梅卡公司的 arriel 系列涡轴发动机^[43]、乌克兰 TB-117 系列发动机和俄罗斯 VK2500 系类发动机等。目前,这种测扭方法在这些发动机的改进型号中已经逐渐被转角测扭法^[44](后续介绍)所取代。

2.2.3 气动参数转换测扭

2006 年, Acker^[45]发明了一种基于流程压力参数的扭矩测量系统,其原理如图 4 所示。在这个系统中,通过测量燃气涡轮进入动力涡轮的入口截面(如图 4 中的 P4)和动力涡轮排气管出口(如图 4 中的 P5)截面的参数来测量扭矩。测量

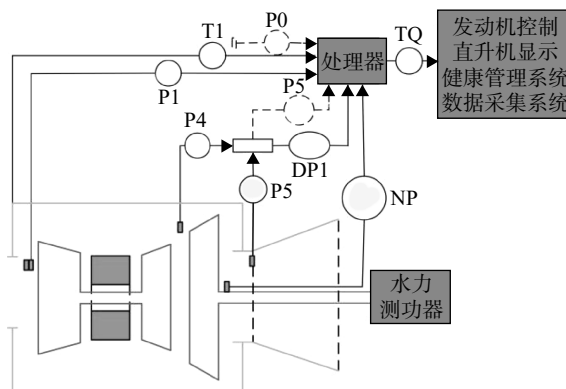


图 4 涡轴发动机流程参数测扭示意图

Fig. 4 Torque measurement diagram of turboshaft engine process parameters

时,需要将大气压力(P0)、大气温度(T1)、动力涡轮入口与出口之间的压力差(DP1)、动力涡轮轴的转速(NP)等发动机工作参数作为测量系统的输入,在涡轴发动机台架试验中利用水力测功器进行标定,并采用优化算法提高拟合公式的精度,最终可计算出动力涡轮输出的扭矩(TQ),用于发动机控制和直升机显示等。

应用气动参数转换测扭方法时,需要针对涡轴发动机建立精确的数学模型,且要求零件制造和部件特性具有高度的一致性,还需要根据各台次发动机建立不同的数学模型。截至目前,尚鲜见到航空发动机上的成功应用案例,预测后续有潜力应用于发动机仿真、数字孪生样机等场景^[46-47]。

2.2.4 转角法测扭

1) 转角法测扭原理

1973 年, Scoppe^[48]提出了一种基于轴扭转变形的非接触测量法,即转角测扭方法。其主要测量原理是:当长为 L 的动力涡轮轴受到扭矩 T 时,在动力涡轮轴剪切刚度 G (材料属性)和截面直径 d (几何属性)的相互约束下,任意两个横截面围绕轴线发生相对转动,从而形成扭转角 θ ,如下式所示。转角测扭方法是涡轴发动机中最常见的扭矩测量方法,其原理简图如图 5 所示。

$$T = \theta \pi G d^4 / (32L)$$

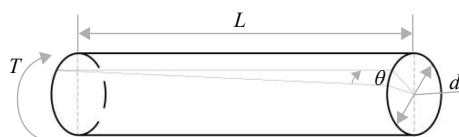


图 5 转角法测扭原理图

Fig. 5 Principle diagram of torque measurement by rotation angle method

2) 转角法测扭结构

以磁电式测扭为例, 转角测扭结构通常为齿形。当“齿”通过传感器时切割传感器探头的磁力线, 能够产生非常易于识别的电信号。齿的位置和设计方法可能因对象不同而不同, 通常采用设置在轴两端的结构形式, 该结构需要两个传感器来拾取信号^[49], 其示意图如图 6 所示。

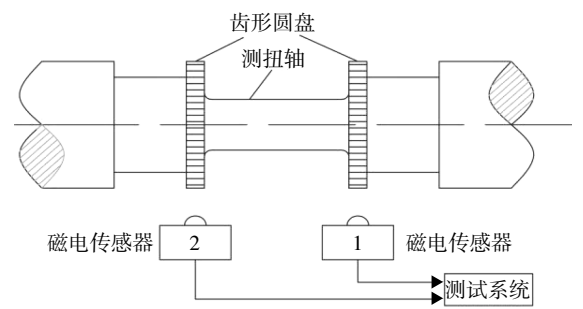


图 6 转角法磁电式测扭示意图

Fig. 6 Magneto-electric torque measurement diagram by rotation angle method

在齿形结构的基础上, 工程师们对转角测扭结构进行了改进^[40,50], 即利用基准轴, 采用将齿设置在轴一端的结构形式, 该结构只需一个传感器即可拾取信号。在工作时轴的扭转变形, 通常会导致轴上的齿偏离原来的位置, 因而相比基准齿, 测扭齿通过传感器时必然存在时间差, 导致信号之间出现相移。该相移与轴传递的功率之间基本呈线性关系, 因此, 可以用于扭矩测量。

转角磁电测扭方法是现代涡轮轴发动机常用的方法, 可以更准确地测量扭矩。图 7 所示为转角法磁电测扭方法(类型)的典型扭矩测量装置, 该扭矩测量装置主要由基准轴、测扭轴和测扭环组成。基准轴通过过盈配合安装在测扭轴的一端(图 7 中右端), 基准轴另一端(图 7 中左端)与动力测扭轴之间有一个小的间隙, 这样扭矩便不会在基准轴上传递; 测扭环安装在测扭轴上, 与基准轴具有轴向间隙; 基准轴和测扭环具有导磁性、可以切割扭矩传感器探头的磁力线, 在扭矩作用

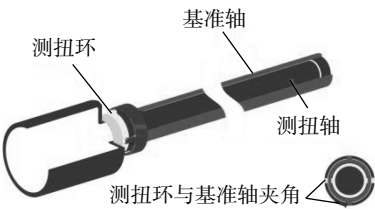


图 7 带基准轴的转角法磁电测扭示意图

Fig. 7 Magneto-electric torque measurement with the reference axis by rotation method

下将形成夹角, 可以用来测量扭矩。

转角磁电式测扭方法最典型的应用是 T700、RTM322 和 Aneto-1K 等涡轴发动机^[51], 其扭转角均大于 5°。

2.2.5 其他类型

此外, 在涡轴发动机上有成功应用或具有应用潜力的测扭方法还有光学式和电容式。

1) 光学式。又主要分为分光电式测扭^[35]和光纤式测扭两种形式^[52]。应用该方法需要在涡轮轴发动机或直升机上设置专门的光学系统, 同时该方法容易受油雾、灰尘等污染, 影响测扭精度。早期, 光学测扭方法被用于直升机扭矩测量的测试改装^[53], 目前在航空发动机上的应用已被磁电测扭所取代。

2) 差分电容式测扭。采用差分电容方法进行扭矩测量时, 动栅极板被安装于传动轴上并接地, 随传动轴共同旋转, 静栅与动栅间距较小且平行相对; 静栅保持固定不动, 以作为传感器信号输出端, 输出微弱差分电容信号(信号包含了传动轴扭角变化的信息), 同时利用传动轴扭角变化和扭矩的相互关系最终得到动态扭矩^[54-55]。差分电容式测扭方法的缺点是: 容易受电磁干扰, 在转速较高时电容信号中可能耦合更多的噪声, 导致测试结果失真。因此, 该方法不适用于军用发动机所处的复杂电磁环境, 但在民用发动机上具有应用潜力。本节介绍了多种涡轴发动机测扭装置, 各自的主要应用场景和未来的主要发展趋势如表 2 所示。

表 2 典型的涡轴发动机测扭装置发展趋势

Table 2 Development of typical torque measuring device of turboshaft engine

测扭装置	适用场景	未来发展方向
外置式	台架试验	高精度、高响应速度、长寿命、低成本
电阻应变片	专项测试试验	高转速、高温、高可靠性、无线传输
液压转换式	带体内减速器的涡轴发动机	小尺寸、低泄漏量、高精度、适应滑油压力范围广
气动参数转换式	整机性能计算 直升机性能计算	数字样机、数字孪生发动机

续表		
测扭装置	适用场景	未来发展方向
转角磁电测扭	常见的涡轴发动机自带测扭装置	紧凑型涡轴发动机高精度测扭
转角光电测扭	早期涡轴发动机适用; 直升机测试改装	逐步被磁电式取代
转角电容式	在发动机上未见应用案例	提高电磁兼容性和耐油雾环境

3 涡轴发动机转角法测扭技术发展方向

如前所述, 涡轴发动机必须设置测扭装置, 目前主要采用转角磁电测扭方法来监测发动机输出扭矩, 并用于计算发动机的输出功率。通常来说, 不同发动机构型对测扭装置的布局和要求可能存在差异性, 但是对于测扭装置的要求基本一致, 即全包线范围内测扭误差小于 4%, 台架测扭误差小于 1%。

功率轴前出的涡轴发动机通常具有细长轴, 可以很容易地实现较大的扭角, 常规设计方法和设计准则可以满足使用要求。然而, 对于功率轴后出的涡轴发动机, 为了追求高功重比采用了紧凑型结构设计, 动力涡轮轴基本均为短粗轴, 长径比小, 刚度过大, 在额定功率下的扭角通常不到 1°, 使得高精度的扭矩测量难以实现, 从而导致直升机不能使用扭矩配平方式, 严重影响直升机的平原使用性能。因此, 这一问题成为紧凑型动力涡轮结构设计的技术“瓶颈”。

为保证涡轴发动机扭矩测量精度, 除了传感器自身向着智能化、多功能、高精度、快速响应以及与其他领域技术^[33,49,56]融合的方向发展外, 也需要在发动机结构上进行一定程度的优化, 使其在额定功率下具有相对较大的扭转角(通常扭角大于 4°)。

3.1 提升温度补偿能力结构

弹性模量是弹性材料的一种最重要的力学性质, 主要决定于材料本身的化学成分, 而热处理和冷热加工对它的影响较小。但是, 在不同的温度条件下, 同一种材料的弹性模量通常差异比较大^[57], 以 40CrNiMoA 为例, 室温(20 ℃)的弹性模量为 209 GPa, 而 200 ℃ 时弹性模量为 205 GPa, 相差达到 2%, 这对于需要进行高精度测扭的航空发动机来说, 影响已经非常大。因此, 在常温静态扭矩标定, 以及工作温度下动态扭矩校准时需要考虑温度补偿^[58-59], 从而提升系统的测量精度。

3.2 采用新型结构增大扭转角度

3.2.1 扭转角度转换成轴向位移结构

为满足紧凑型动力涡轮测扭的需求, 法国透

博梅卡公司设计了一种将周向角度变形量转换为轴向位移的结构^[44]。如图 8 所示。

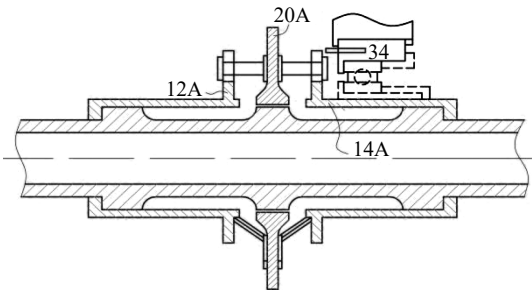


图 8 透博梅卡公司扭转角度转换成轴向位移示意图
Fig. 8 Conversion of torsion angle into axial displacement diagram of turbomeca

该结构将轴扭转变形(图 8 中 12A 和 14A 的扭转相对夹角)转换为测量盘(图 8 中 20A)的 S 形(轴向呈波浪形)变形, 由轴向位移传感器(图 8 中 34)拾取电信号。通过采用该装置, 轴向位移变化 0.2 mm, 对应直径为 80 mm 轴的扭转角度达到了 2°, 这样通过调整拉杆的长度就可以改变相同扭转角度对应测量盘的轴向变形量。在应用该装置后, 还可以配套激光式、磁电式、电容式、电感式、雷达式等位移测量传感器, 使得测量手段更为丰富。目前, 该结构在薄壁测量盘、拉杆强度、振动特性(含扭振特性)等方面, 还需开展深入系统的研究。

3.2.2 增大扭转角度星形结构

采用文中第 3.2.1 节中所述结构, 需要具有较大的径向空间, 与要求部分发动机结构空间严格限制存在矛盾, 因此, 还需开发能够增加扭转角度的新型结构。

针对该问题, 中国航发湖南动力机械研究所某大功率涡轴发动机研究团队提出了一种新型动力涡轮轴结构^[60-61], 该结构可以将传统的圆柱/圆环截面轴变为由芯部圆柱/圆环区域和外部周向均布的加强筋构成的星形结构轴, 如图 9 所示。

在加强筋数量 m , 加强筋厚度 h 及加强筋外径 $\phi_a = 46$ mm 不变的情况下, 通过改变圆柱截面直径 ϕ_b , 可以改变扭转刚度和弯曲刚度(通过角度和挠度来表征)的变化趋势, 如图 10 所示。

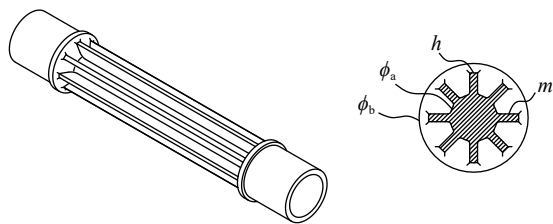


图 9 星形结构轴示意图

Fig. 9 Star shape structure shaft diagram

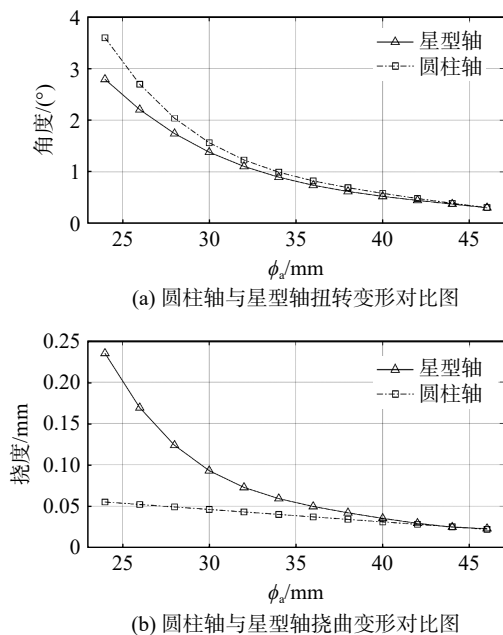


图 10 星形轴与圆柱截面轴变化对比示意图

Fig. 10 Comparison of deflection changes of star-shape shaft and cylindrical section shaft

对比结果表明: 圆柱截面直径 ϕ_a 变化对星形轴的弯曲刚度(或挠度)非常明显, 而对星形轴的扭转刚度影响却很小。产生该现象的主要原因是: 由于星形结构轴外围加强筋区域承担大部分弯曲拉/压应力, 而内部圆柱区域承担大部分的扭转切应力, 使得星形结构轴在弯曲刚度基本不变的前提下可显著降低其扭转刚度, 增大扭转角度。

但星形结构轴加强筋区域周向是几何不连续的, 存在周向刚度异性, 这改变了转子的扭转刚度和弯曲刚度, 从而影响扭转和弯曲模态; 但是, 它对动力涡轮转子振动特性的影响尚不明确, 还需要开展深入细致的研究。

4 结 论

随着新材料、新工艺和新设计技术的发展, 涡轴发动机越来越先进, 对扭矩测量的可靠性、测量精度、响应速度、可集成性、轻质量和工作

环境的要求越来越高。由于涡轴发动机特有的高温、高转速、高振动应力、滑油油雾环境及不允许使用永磁材料的要求, 以及在军用发动机中存在的强电磁干扰的使用环境, 导致大多数的测扭装置不能应用在现有涡轴发动机上。通过分析对比, 作者认为, 目前成熟度高的测量方法主要是磁电式转角测扭法。

在磁电式转角测扭方法的基础上, 本文作者提出的采用温度补偿、扭转角度转换成轴向位移的结构和将动力涡轮短粗轴由圆柱/圆环截面改进成星形截面的新型结构, 均具有提高测扭精度的潜在应用可行性。其中, 星形结构轴可保证足够抗弯刚度的前提下显著降低扭转刚度, 为解决紧凑型动力涡轮测扭技术难题开辟了一种研究方向, 有可能成为未来超紧凑型大功率涡轴发动机测扭的有效方法, 值得深入研究并开展装机适应性验证。

参考文献:

- [1] FLIEH H M, TOTOKI E, LORENZ R D. Dynamic shaft torque observer structure enabling accurate dynamometer transient loss measurements[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, 54(6): 6121-6132.
- [2] SHARAN A S, HIREMATH S S, VENKATESHA C S, et al. Investigation on the critical parameters affecting the working design dynamics of a torque motor employed in an electro-hydraulic servovalve[J]. *Simulation*, 2019, 95(1): 31-49.
- [3] BODIN R M G. Speed or torque probe for gas turbine engines: US8549931[P]. 2013-10-08.
- [4] 胡凯明, 文立华. 新型弹载压电舵机驱动器方案设计及力学分析[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(21): 104-112.
HU Kaiming, WEN Lihua. Scheme design and mechanical analysis about new-type bullet based piezoelectric rudder actuator[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(21): 104-112. (in Chinese)
- [5] ZIREK A, ONAT A. A novel anti-slip control approach for railway vehicles with traction based on adhesion estimation with swarm intelligence[J]. *Railway Engineering Science*, 2020, 28(4): 346-364.
- [6] 张艳辉, 徐坤, 郑春花, 等. 智能电动汽车信息感知技术研究进展[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(4): 794-805.
ZHANG Yanhui, XU Kun, ZHENG Chunhua, et al. Advanced research on information perception technologies of intelligent electric vehicles[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(4): 794-805. (in Chinese)
- [7] 余卓平, 姜伟, 张立军. 四轮轮毂电机驱动电动汽车扭矩分配控制[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(8): 1115-1119.
YU Zhuoping, JIANG Wei, ZHANG Lijun. Torque distribution control for four wheel In-wheel-motor electric vehicle[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2008, 36(8): 1115-1119. (in Chinese)
- [8] 李凯, 袁峰, 胡英辉. 电动舵机减速器扭矩测量误差分析与补偿[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(10): 2271-2278.
LI Kai, YUAN Feng, HU Yinghui. Torque measurement error

- analysis and compensation of electrical steering engine decelerator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(10): 2271-2278. (in Chinese)
- [9] 赵亮. 随钻钻压、扭矩工程参数测量方案研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
- ZHAO Liang. Research on measurement scheme of drilling and torque engineering parameters[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017. (in Chinese)
- [10] 姚斌, 张建勋, 代煜, 等. 用于微创外科手术机器人的多维力传感器解耦方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(1): 147-153.
- YAO Bin, ZHANG Jianxun, DAI Yu, et al. Research on decoupling method of multi-dimensional force sensor used in minimally invasive surgical robot[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(1): 147-153. (in Chinese)
- [11] 吴常斌, 宋爱国, 曾洪, 等. 基于 sEMG 和 GRNN 的手部输出力估计[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(1): 97-104.
- WU Changcheng, SONG Aiguo, ZENG Hong, et al. Force estimation based on s EMG and GRNN[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(1): 97-104. (in Chinese)
- [12] CAI Shibo, WEI Wei, WAN Weiwei, et al. Study on the compliant joint based on magnetorheological fluid transmission: design, simulation and experiments[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(1): 200-210.
- [13] 郭占社, 吴一辉, 孟永钢. 非接触法在微电机力矩测试中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(1): 83-86.
- GUO Zhanshe, WU Yihui, MENG Yonggang. Application of non-contact measurement method to the torque measurement of micro-motors[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(1): 83-86. (in Chinese)
- [14] JASZCZUK W, CZERWIEC W. Experimental studies of static torque/rotor position characteristics of stepper motors[J]. Pomiary Automatyka Kontrola, 2011, 57(11): 1317-1320.
- [15] FREALLE J L C G, PERBOS A M. Detection of the overspeed of a free turbine by measuring using a torque meter: US20130098042 [P]. 2013-04-25.
- [16] 杨艳美, 李概奇, 贺剑, 等. 一种预防航空涡轴发动机涡轮超转破裂的保护方法和系统: CN113719359B[P]. 2022-11-01.
- YANG Yanmei, LI Gaiqi, HE Jian, et al. Protection method and system for preventing overrunning fracturing of turbine of aviation turboshaft engine: CN113719359B[P]. 2022-11-01. (in Chinese)
- [17] 王辉, 韩子良, 刘云辉, 等. 发动机扭矩瞬态响应方法、装置、电子设备及存储介质: CN114576018A[P]. 2022-06-03.
- WANG Hui, HAN Ziliang, LIU Yunhui, et al. Engine torque transient response method and device, electronic equipment and storage medium: CN114576018A[P]. 2022-06-03. (in Chinese)
- [18] TAWADROS P, AWADALLAH M, WALKER P, et al. Using a low-cost bluetooth torque sensor for vehicle jerk and transient torque measurement[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2020, 234(2/3): 423-437.
- [19] RUDNITSKI D M. Guide to the measurement of the transient performance of aircraft turbine engines and components: SMPL-1994-0008[R]. Ottawa: National Research Council Canada, 1994.
- [20] 徐迟. 航空发动机扭矩特性适航规章分析[J]. 燃气轮机技术, 2010, 23(3): 18-20, 10.
- XU Chi. Analysis about airworthiness regulations of aeroengine moment characteristics[J]. Gas Turbine Technology, 2010, 23(3): 18-20, 10. (in Chinese)
- [21] 陈名杨, 张海波, 汪勇. 多发配置下涡轴发动机扭矩匹配控制方法研究[J]. 推进技术, 2020, 41(3): 685-692.
- CHEN Mingyang, ZHANG Haibo, WANG Yong. Torque matching control method of turboshaft engine with multi-engine state[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(3): 685-692. (in Chinese)
- [22] 张海波, 姚文荣, 王日先, 等. 直升机/发动机系统变旋翼转速串行优化方案[J]. 航空动力学报, 2010, 25(10): 2363-2371.
- ZHANG Haibo, YAO Wenrong, WANG Rixian, et al. Rotor speed changeable cascaded optimization method for helicopter/engine system[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(10): 2363-2371. (in Chinese)
- [23] 柴继新, 王恩锋, 范小燕, 等. 几种常见的电阻应变式旋转扭矩传感器[J]. 计测技术, 2010, 30(2): 34-36.
- CHAI Jixin, WANG Enfeng, FAN Xiaoyan, et al. Several common resistances strain gauge rotary torque sensors[J]. Metrology & Measurement Technology, 2010, 30(2): 34-36. (in Chinese)
- [24] RAYMOND S, BAKER D. Torque measurement device for measuring torque on rotatable shafts at high speeds: US7698959[P]. 2010-04-20.
- [25] 祝睿, 蒋锦涛, 袁以宁, 等. 一种基于无线传输的光电式扭矩传感装置: CN113390545B[P]. 2021-12-10.
- ZHU Rui, JIANG Jintao, YUAN Yining, et al. Photoelectric torque sensing device based on wireless transmission: CN113390545B [P]. 2021-12-10. (in Chinese)
- [26] RICHARD J. The measurement of shaft torque using an optical encoder[J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1984, 17: 1194-1199.
- [27] 史文全, 周琦, 吴志勇. 一种非接触式扭矩传感器: CN110749390A[P]. 2020-02-04.
- SHI Wenquan, ZHOU Qi, WU Zhiyong. Non-contact torque sensor: CN110749390A[P]. 2020-02-04. (in Chinese)
- [28] 詹姆斯·刘. 电容式扭矩传感器及智能车辆监测系统: CN113237585B[P]. 2022-08-23.
- JAMES L. Capacitive torque sensor and intelligent vehicle monitoring system: CN113237585B[P]. 2022-08-23. (in Chinese)
- [29] 贾晓玲. 互感式扭矩传感装置及转向系统: CN113049155B [P]. 2022-07-19.
- JIA Xiaoling. Mutual inductance type torque sensing device and steering system: CN113049155B[P]. 2022-07-19. (in Chinese)
- [30] 栾振辉, 刘小球, 朱立博. 可同时进行扭矩检测的行星齿轮减速器: CN103939591A[P]. 2014-07-23.
- LUAN Zhenhui, LIU Xiaoqi, ZHU Libo. Planetary gear speed reducer capable of carrying out torque detection simultaneously: CN103939591A[P]. 2014-07-23. (in Chinese)
- [31] 王岩, 储江伟. 扭矩测量方法现状及发展趋势[J]. 林业机械与木工设备, 2010, 38(11): 14-18.
- WANG Yan, CHU Jiangwei. Current status and development trend of torque measuring methods[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2010, 38(11): 14-18. (in Chinese)
- [32] 王登泉, 杨明, 叶林, 等. 非接触式旋转轴扭矩测量现状[J]. 电子测量技术, 2010, 33(6): 8-12.
- WANG Dengquan, YANG Ming, YE Lin, et al. Study of non-contact torque measurement of rotating shaft[J]. Electronic Measurement Technology, 2010, 33(6): 8-12. (in Chinese)
- [33] 吕华溢, 杨军, 宋娜. 轴系扭矩测量方法与发展趋势[J]. 计测技术, 2017, 37(2): 6-10.
- LYU Huayi, YANG Jun, SONG Na. The methods and development trend of torque measurement for transmission shafting[J]. Metrology & Measurement Technology, 2017, 37(2): 6-10. (in Chinese)
- [34] 贾双权, 刘江, 杨佳彬, 等. 直升机主减速器扭矩检测装置及方法: CN202311599014.5 [P]. 2024-04-16.
- JIA Shuangquan, LIU Jiang, YANG Jiabin, et al. Torque detection device and method for helicopter main reducer: CN202311599014.5 [P]. 2024-04-16. (in Chinese)
- [35] 王辉. 光电式动态扭矩测量系统的设计与实验[D]. 河北 秦

- 皇岛: 燕山大学, 2010.
- WANG Hui. The design and experiment of photoelectricity dynamic torque measurement system[D]. Qinhuangdao Hebei: Yanshan University, 2010. (in Chinese)
- [36] 杨全琪, 黄晋英, 吕海峰, 等. 基于电阻应变片的扭矩测量方法研究[J]. 电子世界, 2014(4): 213.
- YANG Quanqi, HUANG Jinying, LV Haifeng, et al. Research on measurement torque method based on resistance strain gage[J]. Electronics World, 2014(4): 213. (in Chinese)
- [37] ZHAO Yinming, LIU Yang, LI Yongqian, et al. Development and application of resistance strain force sensors[J]. *Sensors*, 2020, 20(20): 5826.
- [38] 李志鹏, 孟旭, 张超, 等. 声表面波扭矩传感器的原理及应用综述[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(3): 5-7.
- LI Zhipeng, MENG Xu, ZHANG Chao, et al. Review of principle and application of SAW torque sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2021, 40(3): 5-7. (in Chinese)
- [39] 马龙祥. EPS 用 SAW 扭矩传感器的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019.
- MA Longxiang. Research on SAW torque sensor for EPS[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2019. (in Chinese)
- [40] CURLIER A, LA GOUELLEC G, KUNAKOVITCH A. Torque-measurement device for a turbomachine shaft: US10168236[P]. 2019-01-01.
- [41] 韩伟. 无线无源声表面波扭矩传感器的回波信号解调方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- HAN Wei. Research on signal demodulation methods of wireless passive surface acoustic wave torque sensor[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [42] 陈智军, 黄维娜, 徐辅庆, 等. 基于声表面波标签的航空发动机扭矩检测系统及检测方法: CN113029582B[P]. 2022-04-05.
- CHEN Zhijun, HUANG Weina, XU Fuqing, et al. Aero-engine torque detection system and detection method based on surface acoustic wave tags: CN113029582B[P]. 2022-04-05. (in Chinese)
- [43] MATHIEU A. Speed reducer for turbopropeller, has measuring unit linked to calculating unit to calculate torque from output signal from measurement unit by relation relating torque, radius of teeth, helix angle of teeth and load induced by teeth: WO2016027024[P]. 2016-02-25.
- [44] HENRI C L. Device for measuring torque in drive shaft of turboshaft engine of helicopter, has sensor formed integral with part of shaft and connected to processing unit for determining torque exerted on shaft from measurement of displacement of disk: FR3014195 [P]. 2017-02-17.
- [45] ACKER B N. Turbine engine differential-pressure torque measurement system: US 7051535[P]. 2006-05-30.
- [46] 曹建国. 航空发动机仿真技术研究现状、挑战和展望[J]. 推进技术, 2018, 39(5): 961-970.
- CAO Jianguo. Status, challenges and perspectives of aero-engine simulation technology[J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(5): 961-970. (in Chinese)
- [47] 孟松鹤, 叶雨玫, 杨强, 等. 数字孪生及其在航空航天中的应用[J]. 航空学报, 2020, 41(9): 023615.
- MENG Songhe, YE Yumei, YANG Qiang, et al. Digital twin and its aerospace applications[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(9): 023615. (in Chinese)
- [48] SCOPPE F E. Advanced torque measurement systems technique[R]. Stratford, US: U. S. Army Air Mobility Research and Development Laboratory, 1973.
- [49] 李志鹏, 王博男, 孟旭, 等. 电磁式扭矩传感器原理、研究现状及发展趋势[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(1): 1-14.
- LI Zhipeng, WANG Bonan, MENG Xu, et al. Principle, study status and development trend of the electromagnetic torque sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(1): 1-14. (in Chinese)
- [50] LAFARGUE O, VOTIE S. Device for measuring torque transmitted by a power shaft: FR3032525[P]. 2016-12-08.
- [51] KEREM K. The analysis of the reference shaft under torque measurement unit for turboshaft engines [M]. Istanbul, Turkey: Sabanci University Press, 2020.
- [52] 张占鹏. 基于分布式光纤的传动轴扭矩测量系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.
- ZHANG Zhanpeng. Research on torque measurement system of drive shaft based on distributed optical fiber[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [53] 李博文, 段发阶, 叶德超, 等. 非接触式直升机传动轴扭矩测量系统设计[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(12): 59-62.
- LI Bowen, DUAN Fajie, YE Dechao, et al. Design of contactless helicopter transmission shaft torque measurement system[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2018, 37(12): 59-62. (in Chinese)
- [54] 刘波. 差分电容式扭矩传感器信号检测与处理系统设计[D]. 太原: 中北大学, 2022.
- LIU Bo. Design of signal detection and processing system for differential capacitive torque sensor[D]. Taiyuan: North University of China, 2022. (in Chinese)
- [55] 戴志萍. 电容式旋转轴动态扭矩传感器设计与优化[D]. 太原: 中北大学, 2022.
- DAI Zhiping. Design and optimization of capacitive rotary shaft dynamic torque sensor[D]. Taiyuan: North University of China, 2022. (in Chinese)
- [56] 罗胜彬. 磁电式扭矩传感器的研究[D]. 成都: 西华大学, 2015.
- LUO Shengbin. Research of magnetoelectric torque sensor[D]. Chengdu: Xihua University, 2015. (in Chinese)
- [57] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- Editorial Board of China aeronautical materials handbook. China aeronautical materials handbook [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese)
- [58] 喻洪麟, 何安国, 史飞, 等. 光扭矩传感器信号转换误差分析[J]. 光电工程, 2003, 30(4): 31-33, 68.
- YU Honglin, HE Anguo, SHI Fei, et al. Conversion error analysis for optical torque sensor signal[J]. Opto-electronic Engineering, 2003, 30(4): 31-33, 68. (in Chinese)
- [59] RENAULT L. Torquemeter for measuring torque of rotation shaft of turboshaft engine in aircraft, has temperature sensor for measuring temperature of fluid in fluid circulation circuit to perform correction of measurement of torque of rotation shaft: FR3046841 [P]. 2018-02-02.
- [60] 余索远, 包幼林, 行峰涛, 等. 一种具测扭功能的紧凑型涡轮轴结构: CN113153439B[P]. 2022-04-22.
- YU Suoyuan, BAO Youlin, XING Fengtao, et al. Compact turbine shaft structure with torque measuring function: CN113153439B[P]. 2022-04-22. (in Chinese)
- [61] 包幼林, 高洁. 航空涡轴发动机全疆域设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2023.
- BAO Youlin, GAO Jie. Whole territory design of aviation turboshaft engine[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2023. (in Chinese)

(编辑: 王碧珺)