圆弧端齿结构设计和加工工艺研究进展与展望*

刘 恒[1,2]，洪 杰[1]，邵伏永[2]，马同玲[2]，李垒栋[2]

（1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院，北京 100191；
2. 北京动力机械研究所，北京 100074）

摘 要：圆弧端齿广泛应用于航空发动机轴系连接，研究其结构设计方法和加工工艺对分析航空发动机转子动力学特性具有重要意义。首先，分析了圆弧端齿结构设计理论，建立了圆弧端齿基本结构参数表述图表，对比了参数化设计方法的异同。其次，介绍了齿面应力仿真分析和试验验证情况，列举了新型结构设计实例，揭示了结构设计技术存在的问题并提出了解决途径。然后，采用弹性平均法解释了圆弧端齿的定心原理，介绍了定心精度分析、装配累积误差分析研究现状和应用情况。最后，评述了圆弧端齿加工工艺方法、加工设备、检测设备、检测方法，指出了当前存在的问题和可能的研究方向。研究结果表明：针对转子设计需求，应系统考虑圆弧端齿结构对转子动力学特性的影响；如果能够解决铣加工精度问题，采用通用设备加工圆弧端齿更具有成本优势；针对精细化检测的迫切需求，需要加快对新型检测方法的研究和探索。

关键词：圆弧端齿；结构设计；加工工艺；综述

中图分类号：V231.9 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-4055（2018）04-0721-10

DOI：10.13675/j. cnki. tjjs. 2018. 04. 001

Progress and Prospect of Structural Design and Processing Technology of CURVIC Coupling

LIU Heng[1, 2]，HONG Jie[1]，SHAO Fu-yong[2]，MA Tong-ling[2]，LI Lei-dong[2]

（1. School of Energy and Power Engineering，Beihang University，Beijing 100191，China；
2. Beijing Power Machinery Institute，Beijing 100074，China）

Abstract：The CURVIC coupling is widely used in the connection of aeroengine shafts. It is of great significance to study its structural design method and machining process for the analysis of aeroengine rotor dynamic characteristics. Firstly，the design theory of CURVIC coupling is analyzed，the basic structural parameters of CURVIC coupling are established，and the similarities and differences of parametric design methods are compared. Secondly，the simulation analysis and test verification of tooth surface stress are introduced，and some new structural design examples are listed. The problems existing in the structural design technology are revealed and the solutions are put forward. Then，the centering principle of CURVIC coupling is explained by means of elastically averaged method. Current situation and application of centering accuracy analysis and assembly accumulative error analysis are introduced. Finally，the processing method，machining equipment，testing equipment and detection method of CURVIC coupling are reviewed，and the existing problems and possible research directions are pointed out. The results show that the effects of the CURVIC coupling structure on the rotor dynamic characteristics should be taken into account to meet rotor design requirements. If the problem of machining precision could be solved，using general equipment for processing CURVIC coupling has cost advantage. According to the urgent needs of fine detection，research and exploration of novel detection method need to be accelerated.

* **收稿日期**：2017-09-13；**修订日期**：2017-11-10。
作者简介：刘 恒，男，博士生，工程师，研究领域为转子动力学。E-mail: h-liu@foxmail.com

Key words：CURVIC coupling；Structural design；Machining process；Review

1 引 言

航空燃气涡轮发动机与地面燃气轮机代表了一个国家基础工业的发展程度。燃气涡轮发动机核心技术和市场长期被通用、普惠、西门子、罗罗等欧美公司控制。随着我国航空、航天、航海和民用电力领域的发展，对燃气涡轮发动机的需求日益增大，尤其在航空领域，对高性能航空燃气涡轮发动机的需求相当强烈，但我国对核心技术的掌握和应用与欧美国家相比仍然存在差距，严重影响我国航空事业的发展和国防安全。目前，第四代战斗机用燃气涡轮发动机即将或者已经投入使用，其具有高性能（高推重比等）、高可靠性、长寿命、低油耗、低信号特征、低全寿命期费用等特点[1]，将使其沿着性能更高、结构更紧凑、质量更轻、可靠性更高、费用更低等方向发展[2]。作为航空发动机性能综合性评价指标，推重比不仅体现航空发动机气动热力循环水平，也体现了结构方面设计水平，直接影响飞机飞行性能和有效载荷。各国均以提高航空发动机推重比这一核心目标为导向，减少发动机转子系统零部件数量，如盘轴一体化结构，采用质量轻、结构紧凑的连接结构。

现代航空燃气涡轮发动机转子常采用拉杆结构，拉杆依次穿过轮盘和轴段，采用螺母紧固，将各级轮盘轴段组合在一起形成转子结构系统。航空发动机转子常见的连接结构主要有圆柱面定心螺栓连接结构、花键连接结构、圆弧端齿连接结构[3]。圆柱面定心螺栓连接结构依靠穿过盘体或法兰的拉杆和螺母紧固[4]，常用于轮盘之间或轮盘与轴之间的连接；花键连接结构依靠内外花键和螺栓紧固，常用于轮盘与轴和轴与轴之间的连接；圆弧端齿连接结构依靠圆弧端齿定心、传扭，采用拉杆和螺母紧固，不但具备前两种连接结构的优点，而且具有自动定心精度高、承载能力强、结构紧凑、重量轻等特点，广泛应用于现代航空发动机转子系统零件之间的连接。

圆弧端齿由格里森公司发明，它由端面离合器[5]演变而来。圆弧端齿连接结构最初用于解决大型活塞发动机曲轴分段制造后的连接问题[6]，与其他类型端齿[7]相比，优点主要有：可以人为地改善啮合副的接触区，避免因边缘接触引起齿的折断；可以避免因载荷变化而引起的边缘接触；可以降低啮合副对装配误差的敏感度；加工工艺性好、生产效率高[8]；定位可靠、定心精度高、承载能力强[9]。因此，圆弧端齿连接结构主要应用于航空燃气涡轮发动机压气机盘和涡轮盘之间的连接，以及轮盘或齿轮与轴之间的连接，如RB199发动机高压压气机与高压轴的连接、阿赫耶发动机涡轮转子之间的连接，以及斯贝、MK202、RB211、EJ200、Trent系列、RTM322、阿杜尔（Adour）等发动机盘轴之间的连接[3]。

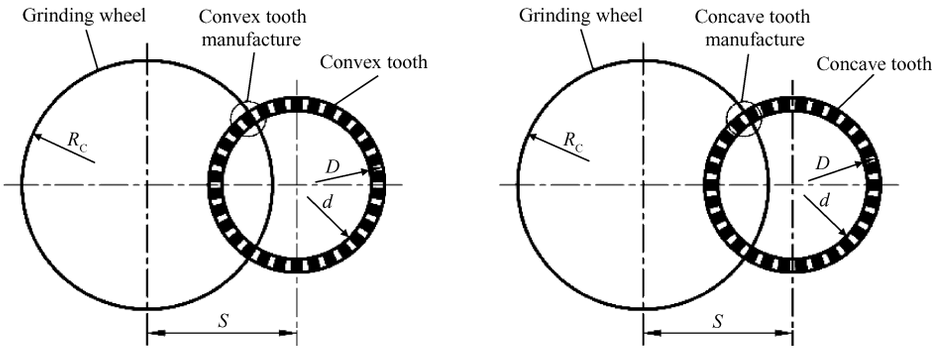
圆弧端齿结构设计与加工工艺技术已经成为航空燃气涡轮发动机转子结构设计的关键技术，圆弧端齿相关研究内容逐渐成为国内外学者关注的热点。然而，国外同行为了保持技术上的领先优势，关于圆弧端齿结构设计和加工工艺的研究文献较少，给从事相关研究的学者带来不便。本文在收集整理圆弧端齿相关研究文献的基础上，对圆弧端齿结构设计和加工工艺国内外研究进展和研究成果进行综合分析和梳理，归纳总结出圆弧端齿基本设计方法和常用加工工艺，揭示当前研究存在的关键问题，并指出了解决途径，为深入研究者提供一定参考和借鉴。

2 结构设计技术研究

圆弧端齿连接结构依靠圆弧端齿定心、传扭，具有自动定心精度高、承载能力强、结构紧凑、重量轻等特点，引起了国内外学者的广泛研究兴趣，从结构设计理论、结构强度分析和新型结构设计三个方面已经开展了大量的研究工作，取得了一定的研究成果。

2.1 结构设计理论

圆弧端齿的设计理念源于螺旋伞齿轮，1942年初，格里森公司的Wildhaber E设计了一种端面离合器[5]，齿在端面周向均匀分布，齿高沿纵向延伸，凹面、凸面均采用弧形齿线且曲率方向位于曲线同侧，除螺旋方向外相互啮合的两个齿轮参数完全相同。因此，这种端面离合器可以被看做是分度锥角为90°，螺旋角为0°的曲齿伞齿轮。端面离合器啮合时齿根和齿顶存在微小间隙，只有齿线附近完全接触，具有曲齿伞齿轮的典型特点，不能算作严格意义上的圆弧端齿。Wildhaber E于同年5月对端面离合器齿型结构进行了更改[10]，首次提出了采用刀具外侧切削齿的凹面、刀具内侧切削齿的凸面，如图1所示，这样的加工方法导致在相互啮合的一对齿中，一个齿的齿面两侧均是圆弧形凹面，另一个齿的齿面两



(a) Convex tooth　　(b) Concave tooth

Fig. 1　CURVIC coupling in machining

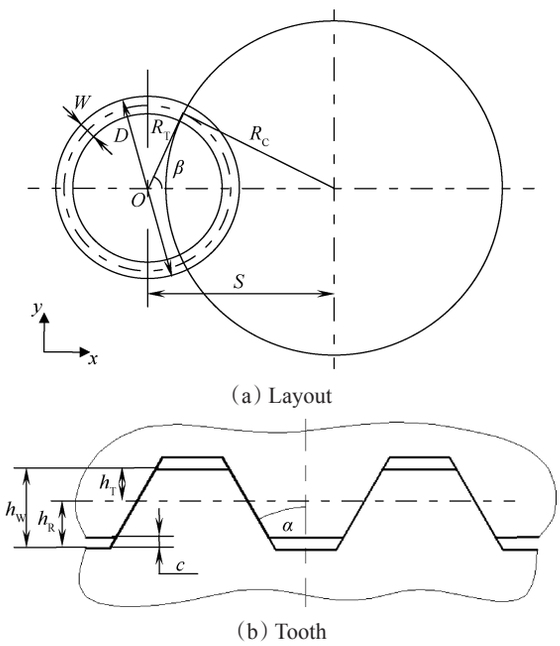
侧均是圆弧形凸面，形成了严格意义上圆弧端齿。基于这种基本形式，国内外学者对圆弧端齿结构设计理论开展了研究。

2.1.1　经典设计理论

自1945年开始，格里森公司不断地发展完善圆弧端齿的结构设计理论[11~13]。1986年，格里森公司详细阐述了圆弧端齿设计流程，介绍基本结构参数数学关系。在此基础上，指出了压力角、齿顶倒角、齿根圆角、山形底、砂轮宽度等参数对结构设计和加工工艺的影响，并提出了强度设计要求和预紧力控制要求[14]。目前为止，该方法是圆弧端齿结构设计的基本方法，随着格里森圆弧端齿专用磨床的应用，该方法也被广泛采用。

国内一些科研院所在翻译和总结国外资料的基础上，结合自身应用对圆弧端齿加工工艺和检测方法进行了学习和研究[11]，形成了适用于行业需求的圆弧端齿设计理论。随着圆弧端齿工程应用的不断发展，分别于2006年和2011年发布了适用于航空发动机圆弧端齿设计和检验的航空行业标准[15,16]，定义了各结构设计参数的含义，总结归纳了圆弧端齿工程设计流程[17]和设计方法[18]。黄发[11]根据圆弧端齿的加工原理，将结构设计参数划分为已知参数和关联参数两部分，其中已知参数为独立量，关联参数由已知参数计算而得，并介绍了齿顶倒角和山形底等局部结构的详细设计方法，在格里森公司提出的基本方法基础上，系统阐述了圆弧端齿结构设计理论。

当前的圆弧端齿结构设计理论均以格里森公司的设计方法为基础，在设计流程和局部结构详细设计方面进行了拓展和创新，虽然结构参数的定义存在细微差别，但没有脱离经典设计理论。通过对比不同设计理论的异同，可将圆弧端齿基本结构参数表述为图2和表1所示的形式。



(a) Layout

(b) Tooth

Fig. 2　Basic structural parameters of CURVIC coupling

2.1.2　参数化设计方法

圆弧端齿结构参数的表述形式与螺旋伞齿轮相似，当具体结构确定后，可以通过参数化方法开展结构设计。

Mueller[19]采用螺旋伞齿轮的计算方法设计圆弧端齿，提出了模块化的设计思路，首先参考标准要求定义基本结构尺寸，其次进行齿面优化和修正，最后根据载荷计算安全系数。文章重点在于介绍螺旋伞齿轮设计思路，虽然指出了圆弧端齿设计方法与螺旋伞齿轮设计方法的差异，但没有给出具体的计算公式和计算示例。Tsai[20]建立了圆弧端齿齿面数学模型，推导了齿面方程，开发了圆弧端齿设计原型系统，以基本设计参数作为输入变量构建圆弧端齿基本结构。刘克俊[9]利用圆弧端齿与螺旋伞齿轮的相似性，结合外文技术资料和测绘仿制数据，根据强度

条件提出了模数、齿数、齿高、螺旋角、压力角、曲率半径、齿厚计算方法。

从参数化设计方法的研究工作可以看出，这些方法不是对经典理论的改进和创新，而是通过建立规范化的设计流程，并借助数学手段和计算机图形学实现圆弧端齿的快速设计和可视化。

2.2 结构强度分析

圆弧端齿啮合后，齿面接触状态复杂，在有限单元法被提出以前，采用经验公式计算圆弧端齿的承载能力。随着有限单元法的应用，对圆弧端齿结构强度的分析越来越细致，国内外学者开展了齿面应力及影响因素仿真和实验研究。

2.2.1 齿面应力分析

Demin[21]对圆弧端齿结构设计及强度计算方法进行了研究；Pisani等[22]采用边界元和有限单元法对航空发动机压气机转子上的圆弧端齿结构单个齿进行了三维非接触分析，利用计算得到的应力集中系数预测二维轴对称非接触有限元模型的应力峰值。Richardson等[23]建立了某大型航空发动机风扇圆弧端齿连接结构的三维有限元接触模型，分析了在扭矩和螺栓预紧力作用下风扇叶片断裂飞出对风扇轮盘和圆弧端齿的影响；此后，Richardson等[24]采用环氧树脂作为圆弧端齿材料，建立了考虑摩擦力的弹性接触有限元模型，并将有限元分析结果与光弹性实验进行了对比二者结果吻合，证明了有限元分析模型的准确性。Bannister等[25]采用解析法对端齿局部应力影响区进行了分析，提出了能够表达应力影响区内应分布情况的应力图表，然后采用有限单元法对受力情况进行了深入分析，不但验证了解析解的准确性，而且得到了比例应力影响区与圆弧端齿基本结构参数的关系。

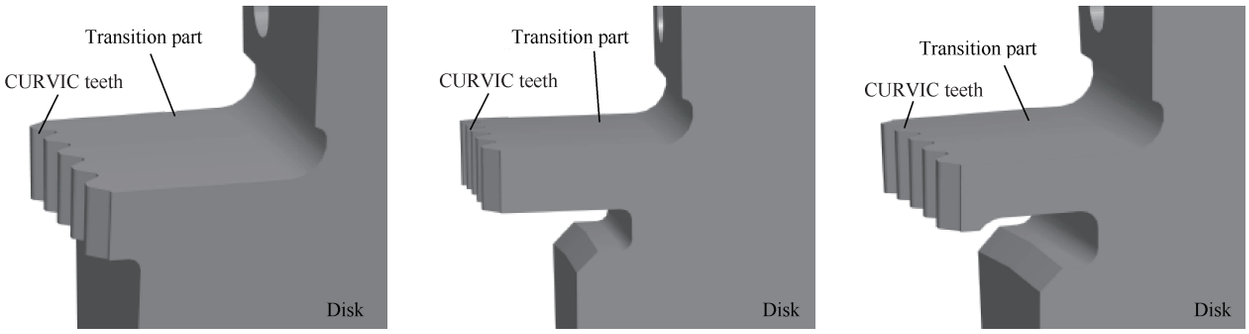
借助于有限单元法光弹性实验，可以准确分析出齿面在稳态下的受力情况，相比之下，齿面瞬态受力情况更为复杂，尚未有相关仿真结果的公开资料。

2.2.2 影响因素分析

Yuan等[26]考虑了摩擦、接触等非线性因素，对某重型燃气涡轮轴向分布拉杆转子进行了建模，分析了圆弧端齿和螺栓在预紧、启动、加速和稳定工作条件下的接触面的应力分布；此后，Yuan等对圆弧端齿与盘体连接薄壁结构对圆弧端齿应力分布的影响进行了研究，薄壁结构不但有助于减少径向应力变化，而且将最大应力点由圆弧端齿内径处转移至外径处，防止来自盘体的应力波动传递至圆弧端齿[27]，如图3所示。李业明[28]对机车用圆弧端齿联轴器进行了考虑非线性接触的有限元静力计算，得到了齿面接触应力分布情况，分析了接触面应力和齿根应力

Table 1 Mathematical relationship of basic structural parameters of CURVIC coupling

Category	Definition	Symbol	Comment
Independent design parameters	Tooth type	/	Convex or concave
	Tooth number	Z	Even
	Diameter pitch	P	Reciprocal of modulus
	Tooth width	W	Grinding conditions should be satisfied
	Tangency radius	R_T	Tangency point of pitch cone circle to center of pitch diameter
	Enveloped tooth number	N	
	Pressure angle	α	
	Whole depth	h_W	
	Clearance	c	
Associated design parameters	Addendum	h_T	$h_T=(h_W-c)/2$
	Dedendum	h_R	$h_R=h_W-h_T$
	Enveloped angle	β	
	Pitch diameter	D	
	Pitch cone circle radius	R_C	$R_C=R_T\times\tan\beta$
	Inner diameter	d	
Machining parameters	Wheel distance	S	$S=R_T/\cos\beta$
	Wheel radius	R_W	$R_W=R_C$
	Point width	W_P	Grinding conditions should be satisfied



(a) Short transition　(b) Medium transition　(c) Long transition

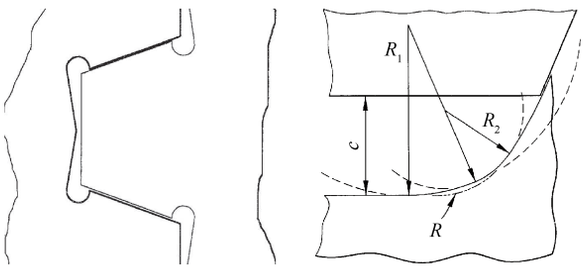
Fig. 3　Various transitions between CURVIC teeth and disk[27]

的变化规律，研究了动不平衡量和弧齿半径对接触应力和齿根应力的影响。

圆弧端齿齿面局部接触应力是国内外学者的研究重点，然而长期的使用经验表明[26,29,30]，对圆弧端齿啮合段局部力学特征的研究不足以解决航空燃气涡轮发动机转子结构设计问题，圆弧端齿齿面接触特性、圆弧端齿连接轴段刚度特性是影响转子动力特性的重要因素，从转子系统角度研究圆弧端齿结构设计技术将是发展趋势。

2.3　新型结构设计

为了提高使用寿命或实现某种特定功能，在基本齿型基础上衍生出一些新型圆弧端齿结构。霍尼韦尔公司和罗罗公司分别针对提高圆弧端齿齿根疲劳寿命和改善齿根与齿顶干涉的需求，提出了圆弧端齿局部结构更改方案[31~33]，对圆弧端齿山形底与齿面过渡圆角进行了重新设计，图4(a)采用退刀槽替代了圆角，图4(b)采用半径分别为 R_1，R_2 的圆角替代了半径为 R 的圆角。陈龙等[34,35]在格里森公司提出的圆弧端齿设计方法基础上提出了一些局部创新设计，修改了圆弧端齿局部结构，如图5(a)，图5(b)所示，提高了抗离心力、拉杆预紧力和热应力的能力以及气流通过能力。

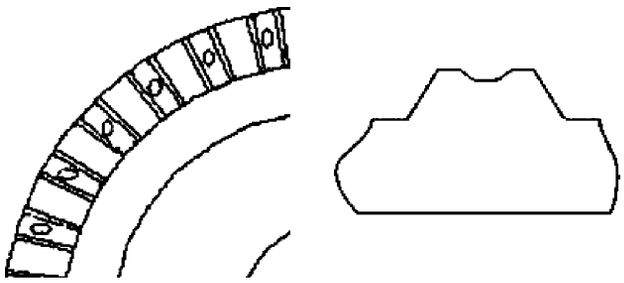


(a) Root transition[32]　(b) Compound fillet radius[31]

Fig. 4　Root optimization of CURVIC coupling

3　定位原理研究

圆弧端齿不但能够传递较大的载荷，而且具有较高的重复定位能力，国内外学者对结构设计方面的研究较多，但对定位精度方面的研究较少。



(a) Lightening hole[34]　(b) Lightening slot[35]

Fig. 5　Face optimization of CURVIC coupling

3.1　定心原理

两平面装配定位的方法主要有运动学支承约束法和弹性平均法[36]。在设计连接结构时，至少应满足运动学支承约束设计原则，对于承受载荷的可重复装配结构连接界面，可采用更多的约束，通过弹性平均实现精确定位[37]。运动学支承设计通过自由度精确控制零件间相互关系[38]，而弹性平均法利用工程材料内在的弹性，通过误差平均提高精度[39]。

3.1.1　弹性平均原理

圆弧端齿采用弹性平均原理定位，两个相互啮合的端齿盘在轻微接触时会因齿面制造误差在某些齿面间产生轻微干涉或微小间隙，当两端齿盘受轴向压力紧密贴合时，各齿面的弹性变形使制造误差被平均[40]，获得比单个齿位置精度更高的定位精度[41]。弹性平均的关键是控制遍布于宽阔范围内大量特征在装配时受力并发生弹性变形[42]，使单个特征产生的误差通过特征数量被平均，有效补偿定位误差[40,43]。与运动学支承约束法相比，弹性平均能够在保证定位精度、降低局部应力的同时提高小尺寸零件的刚度和承载能力[40,41]。

Slocum 等[44]对弹性平均法进行了实验研究，在两个硅晶片上采用氢氧化钾分别腐蚀出的棱锥和凹

槽，如图6所示，二者相互接触并施加一定的载荷，装配定位精度可以达到亚微米级。Slocum[37]在介绍运动学支承约束定位设计理论和应用的综述中，将销钉定位、柔性运动学支承约束定位、弹性平均定位、准运动学支承约束定位、运动学支承约束定位等五种定位方法的重复定位精度进行了对比，如表2所示，弹性平均约束定位精度适中，可以达到微米级。

近年来，随着弹性平均理论研究的不断深入，出现了多样化的弹性平均原理的工程应用实例，涉及印刷线路板制造[41]、汽车制造和装配等领域[45~50]。相比之下，国内对弹性平均原理在圆弧端齿结构设计方面的应用研究较少。

3.1.2 定心精度评估

杨友东等[51]介绍了端齿盘误差平均效应原理，指出端齿盘的分度精度不但与制造精度有关，而且与端齿盘齿数和齿的弹性误差补偿效应有关，根据对重复定位精度和不同承载力下弹性误差补偿效应的实验分析，根据端齿盘加工精度、齿数、材料、测量条件等因素估算出端齿盘分度精度计算经验公式。Marziale等[52]在分析车削对刀法的基础上提出了圆分度误差的封闭性原理，推演了圆分度误差封闭性的数学关系式，给出了圆分度误差真值的计算方法。

目前，虽然圆弧端齿已广泛应用于多型航空燃气涡轮发动机转子联轴器设计，但仍然缺少对圆弧端齿定心原理的理论研究，在设计端齿连接精度时缺少必要的理论依据，在处理因圆弧端齿定心偏差导致的转子动力学问题时，缺少必要的评估和改进手段。

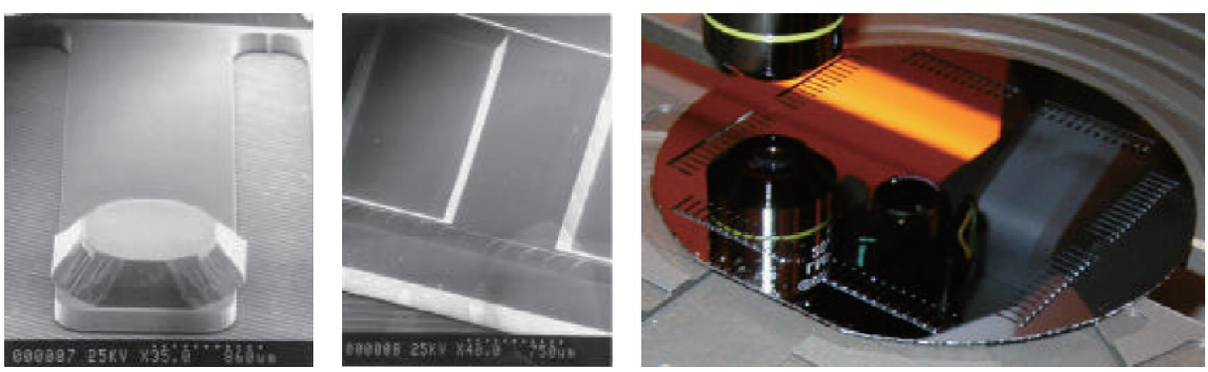
3.2 装配累积误差

圆弧端齿作为航空发动机转子部件连接结构，其定心能力影响转子装配质量。圆弧端齿连接级数越多，误差累积情况越复杂，如图7所示，因此需要科学的方法和手段评估装配累积误差。装配累积公差分析应用领域广泛，但针对圆弧端齿连接结构累积误差研究较少。Davision等[53]对圆弧端齿联轴器装配跳动问题的研究最具有代表性。Davision针对多个圆弧端齿连接结构相互连接产生的转子装配累积误差问题，提出了端齿联接结构虚拟装配及其优化方法，用5个参数定义零件坐标系，根据实测零件轴向、径向跳动误差利用优化算法计算使转子跳动达到最小值的最佳装配组合。

随着航空燃气涡轮发动机结构设计发展，装配累积误差对转子系统的影响受到越来越多的关注，对丰富采用圆弧端齿连接多级转子定位精度研究手段具有积极意义。

4 加工与检测技术研究

圆弧端齿加工工艺与检测方法一直是航空发动机设计、制造领域的研究热点，国内外学者公开了很



(a) Convex (b) Concave (c) Testing

Fig. 6 Convex and concave silicone wafer in testing[44]

Table 2 Relative repeatability of different types of connections[37]

	0.01μm	0.10μm	1.0μm	10μm	100μm
Pinned joints					
Flexural kinematic couplings					
Elastic averaging					
Quasi-kinematic couplings					
Kinematic couplings					

多研究成果，内容涉及加工设备、工艺参数、检测设备、检测精度等方面。

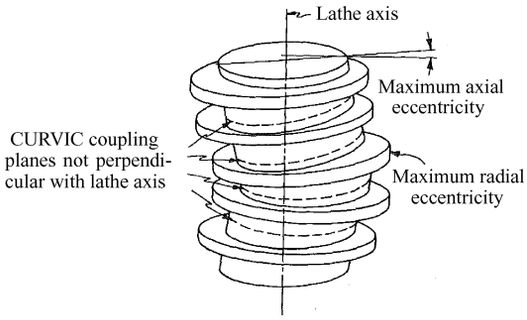


Fig. 7　Undesirable accumulation of radial eccentricities of individual parts[53]

4.1　加工工艺

格里森公司首先提出采用平面铣刀加工圆弧端齿[10]，铣刀的内径加工圆弧端齿的凸面，外径加工凹面。为了提高圆弧端齿加工效率，降低加工成本，格里森公司在随后的专利中优化了加工方法，采用成型砂轮代替平面铣刀加工圆弧端齿，在此基础上开发了圆弧端齿专用磨床，并申请了多项专利[54,55]。西门子、通用电气和罗罗公司也对圆弧端齿加工工艺进行了研究[56~60]。从国外的工程经验可以看出，圆弧端齿的加工虽然是独立工序，由于涉及到基准转换，不能将圆弧端齿加工与零件其他尺寸的加工相剥离。经过多年的摸索，我国一些科研院所已经掌握了圆弧端齿加工工艺，从检测和应用效果来看，加工工艺能够生产出满足使用要求的产品。

带有圆弧端齿的零件工艺路线与零件的具体结构有关，但应把圆弧端齿磨削作为零件加工的最后一道工序，这样可以借助较为精密的端面基准和圆柱面基准找正，便于控制圆弧端齿加工精度。工程上，一般将找正误差控制在5μm以内，加工完成后的圆弧端齿联轴器径向跳动可以控制在0.01mm以内。

4.2　加工设备

成型砂轮磨削是圆弧端齿加工的主流方法，目前常见的端齿磨床主要是格里森公司生产的No.120，No.130，No.560型以及887CNC端齿磨床（图8）[28]，这些磨床大多基于铣床开发，需要根据机床调整卡配调来提高磨削精度。除此之外还有Klingelnberg公司生产的磨齿成型平台、日本iGinder G5系列卧式圆弧端齿磨床[11]，以及斯来福临集团旗下保宁公司生产的PROFIMAT MC 610VS立式磨床。国内圆弧端齿加工设备几乎被国外垄断，但一些民营企业已掌握了圆弧端齿磨削设备的核心技术，如北京广宇大成数控机床有限公司自主研发的圆弧端齿磨床磨削精度与外国机床基本相当，该设备的研发获得了北京市科委的资助[61]。

Fig. 8　Gleason 887CNC CURVIC coupling grinding machine

国外对圆弧端齿加工领域研究非常成熟，形成了完整的设计、加工体系，产品广泛应用于航空发动机研制。作为圆弧端齿的发明者，格里森圆弧端齿磨床在国内的市场占有率较高，因此国内对圆弧端齿加工工艺方面的研究主要是对格里森圆弧端齿磨床加工参数的研究[6,62,63]。由于圆弧端齿磨削需要采用格里森专用设备，在早期研发条件下，难以利用非专用设备实现对圆弧端齿的试制，为解决这一问题，国内一些专家学者在这方面进行了一些探索[64,65]，填补了国内技术空白，但仍然存在加工精度低导致定位精度差的问题。

随着我国科研人员对圆弧端齿加工技术研究的深入，与国外的差距在逐步缩小，但在加工设备研发方面，与国外仍存在较大差距。一方面，国外加工设备精度稳定性好，在技术上领先于国产设备；另一方面，国内市场对国产设备缺乏信心，使国产设备在竞争中处于劣势地位。

4.3　检测方法

在伞齿轮传动中，齿面接触区位置、形状、大小对齿轮传动影响很大，压力角、螺旋角、齿型等参数误差都可以通过检查接触区精度综合反映出来，作为生产和验收时的主要检验项目，工程上常采用着色剂辅助接触区检测[66]。

目前广泛采用的圆弧端齿检测法由格里森公司首次提出，检测指标有叠加尺寸、径向跳动和轴向跳动、角向位置、接触区四项。检测时需要使用与待检产品相互啮合的标准量规。以标准量规轴向端面、径向圆柱面、角向特征为基准，采用千分表、三坐标测量仪等工具分别检测叠加尺寸、径向跳动和轴向跳动、角向位置。进行接触区检测时，需要在标准量规和待检产品上分别涂抹蓝色和红褐色着色剂，着

色层厚度约为0.003～0.005μm[67]，然后将两齿啮合并沿周向轻微敲击使着色剂充分接触，最后将两端齿分开，着色样式如图9所示，最终对照标准着色样式判定检测结果，如图10所示。

Fig. 9 Actual contact pattern of CURVIC coupling

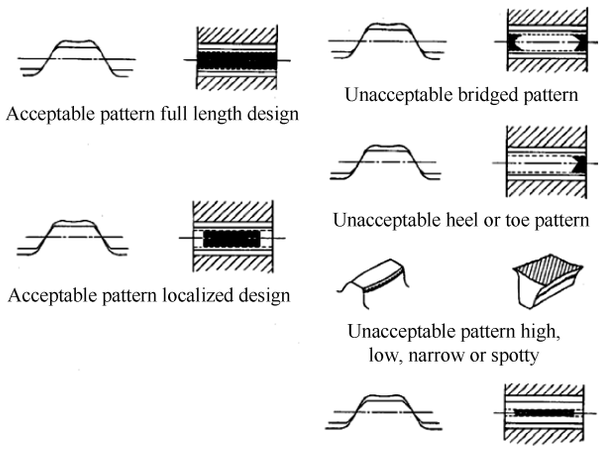


Fig. 10 Contact pattern criteria of CURVIC coupling[68]

中航工业哈尔滨发动机集团的徐连军[68]、沈阳黎明发动机集团的胡荣辉等[69]根据格里森公司的技术资料，结合实际工程经验，对毛刷材料、着色剂成分等提出了细致要求，总结出适合本单位实际情况的圆弧端齿检测方法。考虑到大批量检测可能导致标准量规磨损，徐连军将标准量规分为三个级别，分别是原始量规、校对量规、检验量规[68]。标准量规三级分类不但保证了标准量规的唯一性，而且解决了不同部门量规校验和量规磨损问题。2011年公布的圆弧端齿检验标准[16]中也采用了这种量规管理方法，规定将齿距、平行度、同轴度、径向跳动、轴向跳动、叠加尺寸等尺寸公差作为检测指标。

随着测量技术的发展，高精度测量设备已被广泛应用于机械零件测量，使圆弧端齿齿面检测成为可能。Orchard[67]采用普通三坐标测量仪对圆弧端齿齿面进行了测量，使设计参数与着色样式的关联关系建立成为可能。Nielson[70]设计并铣加工了实验用圆弧端齿副，采用格里森公司提出的检测方法对端齿接触区进行了着色检验，利用三坐标测量仪参照三维模型理论点对圆弧端齿副进行了重复测量，结果表明，三坐标测量点分析结果与着色检验统计结果相关。

国内外学者在圆弧端齿啮合检测技术方面做了多种尝试，受到效率、成本等因素的限制，在实际工程应用中，其他方法难以替代着色检测法。虽然根据着色样式可以直接判定圆弧端齿齿面加工质量，但在着色样式不合格时难以根据着色样式识别问题参数，给工艺参数调整带来困难。

5 存在的问题及解决途径

在结构设计方面，针对齿型或齿面局部的结构研究已经不能满足航空燃气涡轮发动机转子设计的需求，应从系统角度研究圆弧端齿结构、转子连接结构、定心误差等因素对转子系统的影响规律已成为新的研究方向；在结构强度方面，转子工况对圆弧端齿疲劳寿命的影响尚未引起足够重视，虽然一些学者采用传统方法评估了圆弧端齿的寿命，但缺少相关实验研究作为支撑；在定心原理方面，尚没有可用于评估定心精度的系统理论；在加工工艺方面，虽然成型砂轮磨削加工工艺成熟，但需要采用专用设备加工，针对研制初期产品批量较小的情况，如果能够解决铣加工精度问题，采用通用设备加工圆弧端齿更具有成本优势；在检测方法方面，虽然着色检测法广泛应用于工程实际，但难以直观判断工艺参数的变化情况，针对精细化检测的迫切需求，需要加快对新型检测方法的研究和探索。

6 结论与展望

本文介绍了圆弧端齿的发展历程，阐述了圆弧端齿结构设计理论、强度分析方法，分析了定心原理、加工与检测技术的研究现状，指出了当前存在问题，提出了解决途径。随着齿型结构设计和加工工艺不断稳定、成熟，以及圆弧端齿应用由轻载、低速向重载、高速的转变，以下研究内容可能成为未来的研究热点：

(1)圆弧端齿疲劳寿命研究。

(2)带有圆弧端齿连接结构的转子动力学特性研究。

(3)圆弧端齿定心精度评估方法研究。

(4)圆弧端齿新型加工和检测方法研究。

参考文献：

[1] 林左鸣. 战斗机发动机的研制现状和发展趋势[J].

航空发动机，2006，32(1)：1-8.

[2] 刘大响，程荣辉. 世界航空动力技术的现状及发展动向[J]. 北京航空航天大学学报，2002，28(5)：490-496.

[3] 陈 光，洪 杰，马艳红. 航空燃气涡轮发动机结构[M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2010.

[4] 姚星宇，王建军. 航空发动机螺栓连接载荷与结构参数对连接刚度影响规律[J]. 推进技术，2017，38(2)：424-433.（YAO Xing-yu，WANG Jian-jun. Effects of Load and Structure Parameters of Aero-Engine[J]. *Journal of Propulsion Technology*，2017，38(2)：424-433.）

[5] Wildhaber E. Face Clutch[P]. *US:* 2429284，1942-02-23.

[6] 林 磊，马 健，邱嘉宁，等. 航空用圆弧端齿工程设计初步研究[J]. 燃气涡轮试验与研究，2015，28(4)：41-44.

[7] Oberg E，Jones F D，Horton H L，et al. Machinery´s Handbook Guide 28th Edition[M]. *New York: Industrial Press*，2008.

[8] Jiang X，Zhu Y，Hong J. Development and Validation of Analytical Model for Stiffness Analysis of Curvic Coupling in Tightening[J]. *Journal of Aerospace Engineering*，2014，27(4)：1-14.

[9] 刘克俊. 弧齿离合器的设计与计算[J]. 机械设计，1985，(3)：41-53.

[10] Wildhaber E. Face Clutch[P]. *US:* 2384582，1942-05-22.

[11] 黄 发. 圆弧端齿结构设计方法研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2013.

[12] Gleason Works. Curvic Coupling Design[M]. *New York: Rochester*，1973.

[13] Gleason Works Corporation. Curvic Coupling Dimension Sheet Explanations[R]. *New York: Rochester*，1973.

[14] Gleason Works Corporation. Curvic Coupling Design[J]. *Gear Technology*，1986，(6)：34-48.

[15] 中国航空动力机械研究所，中国航空综合技术研究所. HB 7808-2006圆弧端齿[S]. 北京：中国航空综合技术研究所，2006.

[16] 中国航空动力机械研究所，南方航空动力机械公司，中国航空综合技术研究所. HB 20046-2011圆弧端齿检验[S]. 北京：中国航空综合技术研究所，2011.

[17] Wildhaber E. Face Clutch[P]. *US:* 2384583，1942-11-07.

[18] 吴鸿雁，李剑锋，王青云，等. 端面弧齿齿盘的齿面方程及齿面磨削加工仿真[J]. 机械传动，2007，31(3)：75-78.

[19] Mueller H，Wiener D，Dutschk R. A Modular Approach to Computing Spiral Bevel Gears and Curvic Couplings[J]. *Gear Technology*，2000，17(3)：32-34.

[20] Tsai Y C，Hsu W Y. A Study on the CAD/CAD of Curvic Couplings[C]. *Amsterdam: Proceedings of ASME Turbo Exposition*，2002：1-6.

[21] Demin A I. Calculation and Design of Curvic Couplings[J]. *Machines & Tooling*，1978，49(1)：27-30.

[22] Pisani S R，Rencis J J. Investigating CURVIC Coupling Behavior by Utilizing Two-and Three-Dimensional Boundary and Finite Element Methods[J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*，2000，24(3)：271-275.

[23] Richardson I J，Hyde T M，Becker A A，et al. A Three-Dimensional Finite Element Investigation of the Bolt Stresses in an Aero-Engine Curvic Coupling under a Blade Release Condition[J]. *Journal of Aerospace Engineering*，2000，214(4)：231-245.

[24] Richardson I J，Hyde T H，Becker A A，et al. A Validation of the Three-Dimensional Finite Element Contact Method for Use with Curvic Couplings[J]. *Journal of Aerospace Engineering*，2002，216(2)：63-75.

[25] Bannister R H. Methods for Modelling Flanged and Curvic Couplings for Dynamic Analysis of Complex Rotor Constructions[J]. *ASME Transactions Journal of Mechanical Design*，1980，102(1)：130-139.

[26] Yuan S，Zhang Y，Zhang Y，et al. Stress Distribution and Contact Status Analysis of a Bolted Rotor with Curvic Couplings[J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*，2010，224(9)：1815-1829.

[27] Yuan S，Zhang Y，Zhu Y. Influence of Thin-Wall Structure on Stress Distribution of Curvic Couplings[J]. *Journal of Theoretical & Applied Mechanics*，2015，45(3)：37-52.

[28] 李业明. 大功率机车弹性联轴器及圆弧端齿联结技术研究[D]. 成都：西南交通大学，2009.

[29] 李 浦，袁 奇，高 进，等. 周向拉杆转子轮盘端面齿接触应力分析[J]. 热力透平，2013，42(1)：25-29.

[30] 李辉光，刘 恒，虞 烈. 粗糙机械结合面的接触刚度研究[J]. 西安交通大学学报，2011，45(6)：69-74.

[31] Muju S，Sandoval R S. Curvic Coupling Fatigue Life Enhancement through Unique Compound Root Fillet Design[P]. *US:* 6672966 *B*2，2004-06-06.

[32] Dornfeld M S，Roever D M，Potter M，et al. Face Coupling[P]. *US:* 8465373 *B*2，2013-06-18.

[33] 李爱民，崔海涛，温卫东，等. 航空圆弧端齿的齿根双圆弧结构设计及优化[J]. 推进技术，2016，37(1)：146-155.（LI Ai-min，CUI Hai-tao，WEN Wei-dong，et al. Design and Optimization of Curvic Coupling with Double Circular-Arc Root Fillet in Aero-Engine[J]. *Journal of Propulsion Technology*，2016，37(1)：146-155.）

[34] 陈 龙，蔡显新. 一种圆弧端齿轮[P]. 中国专利：

*CN*201651231*U*, 2010-11-24.

[35] 陈 龙, 石 林, 王宇星, 等. 圆弧端齿联轴器[P]. 中国专利:*CN*202220805*U*, 2012-05-16.

[36] Slocum A H. Precision Machine Design[M]. *Englewood Cliffs: Prentice-Hall*, 1992.

[37] Slocum A H. Kinematic Couplings: A Review of Design Principles and Applications[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2010, 50(4): 310-327.

[38] 陈晓娟, 吴文凯, 傅学农, 等. 精确约束支承结构在惯性约束聚变装置中的应用与研究[J]. 机械科学与技术, 2009, 28(8): 1111-1120.

[39] De Vicq A N. Precision Engineering: An Evolutionary view[J]. *Precision Engineering*, 1990, 12(3): 180-181.

[40] Willoughby P. Elastically Averaged Precision Alignment[D]. *Cambridge: Massachusetts Institute of Technology*, 2005.

[41] Slocum A H, Chiu M A, Hobbs E D, et al. Kinematic and Elastically Averaged Joints Connecting the Past, Present and Future[C]. *Japan: International Symposium on Ultraprecision Engineering and Nanotechnology*, 2013: 1-4.

[42] Willoughby P J, Slocum A H. Precision Connector Assembly Using Elastic Averaging[C]. *Orlando: ASPE Annual Conference*, 2004.

[43] Rowe K G, Dickrell D J, Sawyer W G. Interrupted Measurement Repositioning Using Elastic Averaging[J]. *Tribology Letters*, 2015, 59(1): 1-3.

[44] Slocum A H, Weber A C. Precision Passive Mechanical Alignment of Wafers[J]. *Journal of Microeletromechanical Systems*, 2003, 12(6): 826-833.

[45] Kiester T A, Morris S E, West K L, et al. Elastically Averaged Alignment Systems and Methods[P]. *US:* 9238488 *B*2, 2016-01-19.

[46] Smith M A, Zhao X, Daul R C, et al. Using Elastic Averaging for Alignment of Battery Stack, Fuel Cell Stack, or Other Vehicle Assembly[P]. *US:* 20120115010 *A*1, 2012-05-10.

[47] Colombo J. Elastically Averaged Alignment Systems and Methods[P]. *US:* 20150016918 *A*1, 2015-01-15.

[48] Morris S E, Lawall J P. Elastically Averaged Alignment Systems and Methods Thereof[P]. *US:* 20150166124 *A*1, 2015-06-18.

[49] Colombo J, Morris S E, Lawall J P, et al. Elastically Averaged Alignment Systems and Methods[P]. *US:* 20150232130 *A*1, 2015-08-20.

[50] Morris S E, Lawall J P. Elastically Averaged Alignment Systems and Methods 2014[P]. *US:* 20150375798 *A*1, 2015-12-31.

[51] 杨友东, 谷振华. 基于误差平均效应分度装置的分度精度的研究[J]. 应用科技, 2002, 29(7): 1-3.

[52] Marziale M, Polin W. Review of Variational Models for Tolerance Analysis of an Assembly[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Engineering Manufacture*, 2011, 225(3): 305-318.

[53] Davidson J K, Wilcox L E. Minimizing Assembly Runout in Turbo-Machines Made with Curvic Couplings[J]. *Journal of Engineering for Power*, 1976, (1): 37-46.

[54] Wildhaber E. Method for Grinding Toothed Faced Members[P]. *US:* 2401446, 1946-06-04.

[55] Wildhaber E. Method of Producing Faced Clutches[P]. *US:* 2443089, 1943-01-04.

[56] Lanes G, Nelson M. Curvic Wheel Dressing[P]. *US:* 2010/0236537 *A*1, 2010-09-23.

[57] Brugess G M. Method and Apparatus for Machining a Coupling[P]. *US:* 7052379, 2006-05-30.

[58] Lanes G, Nelson M. Curvic Wheel Dressing[P]. *US:* 8465344 *B*2, 2013-06-18.

[59] Dornfeld M S, Roever D M, Potter M, et al. Face Coupling[P]. *US:* 20110158744 *A*1, 2009-12-29.

[60] Brugess G. Method and Apparatus for Machining a Coupling[P]. *US:* 20070049182 *A*1, 2006-04-05.

[61] 于启军, 肖 雷. 圆弧端齿的加工[J]. 工艺与检测, 2014, (5): 114-116.

[62] 刘青海. 圆弧端齿的加工[J]. 机械制造, 1990, (12): 12-14.

[63] 吴序堂, 王小椿. 格里森弧齿离合器的设计及加工原理[J]. 齿轮, 1987, 11(5): 33-37.

[64] 蔺志强, 张森堂, 吴志新, 等. 圆弧端齿数控加工技术研究[J]. 科技纵横, 2009, (12): 184-186.

[65] 顾天胜. 关于圆弧端齿数控加工技术的分析[J]. 新技术新工艺, 2011, (11): 46-48.

[66] 刘振宇. 计算机图形图像技术在航空弧齿锥齿轮检测中的应用研究[D]. 西安:西北工业大学, 2004.

[67] Orchard N B. Inspection of Curvic Couplings using a CMM[C]. *Lamdamap: Proceeding of the 6th International Conference and Exhibition on Laser Metrology and Machine Performance*, 2003: 221-230.

[68] 徐连军. 圆弧端齿测量方法研究[J]. 中国新技术新产品, 2011, (9): 132-132.

[69] 胡荣辉, 王 玉, 王 东, 等. 圆弧端齿检测技术研究[J]. 航空精密制造技术, 2013, 49(5): 54-56.

[70] Nielson B J. Digital Inspection of Fixed CURVIC Coupling Contact Pattern[D]. *San Luis Obispo: California Polytechnic State University*, 2012.

(编辑:梅 瑛)