DOI: 10.3901/JME.2019.09.090

螺旋内齿圈拉刀结构分析及制造方法概述*

贾 康^{1,2} 洪 军^{1,2}

(1. 西安交通大学现代设计与转子轴承系统教育部重点实验室 西安 710054;
2. 西安交通大学机械工程学院 西安 710049)

摘要: 对螺旋内齿圈螺旋拉刀的基本结构和整体制造流程及方法进行了解析。从轿车用自动变速箱的螺旋内齿圈结构出发,对螺旋拉刀的粗切段、精切段的具体结构和工作原理进行了分析。对螺旋拉刀制造中前刀面刃磨的砂轮姿态设置、有后角要求的精切齿切削刃磨削、不同齿形交替排列粗切段的切削齿加工干涉、切削余量在廓形方向分布的精切齿铲背操作中的干涉等问题,结合制造工艺进行了相应的基本分析。根据螺旋拉刀粗切段和精切段的切削齿分布形式和具体结构,分别制订了合理的制造流程,并给出了优化后的精切段台阶结构走刀路径形式。结合制造流程,给出了简洁的在机检测工序,并指出跨棒距和测头检测的可行条件及操作注意事项。开发出参数输入界面优化的螺旋拉刀制造 CAM 软件,完整地实现了粗切段、精切段的试磨和检测。结果表明,提出的整套制造流程和相关的制造问题数学解析有利地支撑了螺旋内齿圈拉刀的制造。

关键词: 螺旋内齿圈拉刀; 螺旋前刀面刃磨; 干涉回避; 工艺流程规划; 路径规划; 在机检测

中图分类号: TH164

A Survey on the Structure and Manufacturing of Helical Broaching Tools

JIA Kang^{1,2} HONG Jun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design & Rotor-Bearing System, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054;
2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract: The geometric structure and the manufacturing procedure as well as the corresponding methods for the helical broaching tool are analyzed. In basis of analyze the structure of internal helical ring gear, both the rough cutting section and the finishing cutting section are detailed described on the geometric structure and the work principle. Critical questions i.e. orientation of the grinding wheel for the rake flank sharpen, grinding method for the cutting edge of cutting teeth with backoff requirement, the interference avoidance during the alternative placed cutting teeth grind and the interference avoidance between the finishing cutting teeth grinding are introduced. Reasonable processing routes for helical broaching tool grinding are given, and the optimal step-shape grinding path for finishing cutting section machining is developed. With combine processing route, concise on-line inspections are indicated. The noticeable conditions of on-line inspection that based on both the distance of pin and probe are discussed. With employing the helical broaching tool grinding CAM software that configures with optimal parameter input interface, the machining rough cutting section and the finishing cutting section of the helical broaching as well as the inspection results verify the contributions of the proposed helical broaching tool manufacturing method.

Key words: internal helical broaching tools; helical rake flank sharpening; interferences avoidance; processing route; machining path planning; on-line inspection

0 前言

相较于直齿轮,螺旋内齿圈(图 1)作为行星轮系的重要组成零件,其大重合度使得轮系具有传动平稳、承载能力大、噪音小等优点,因此在汽车齿轮结构自动变速器(Automatic transmission, AT)中得

到了广泛的应用。有数据表明^[1],我国 2013 年自动变速器装机量约 530 万台,其中 AT 约占 72.2%。但是,我国自主品牌自 AT 装机率却仅有 17%,且其中大部分关键零部件都需要进口。目前国外品牌及合资厂商主要定位在舒适性更好、油耗更低的 8AT、9AT 和 10AT,但我国自主品牌还主要在 4AT 到 6AT。因此,我国汽车制造业面临的挑战依然很严峻,自动变速器所需关键零部件的自主制造至关重要。尤其是螺旋内齿圈,相对于外齿轮,在零件精度的控

* 国家科技重大专项资助项目(2017ZX04012001)。20180516 收到初稿,20181221 收到修改稿

制中难度很大,导致了量产受限。这些因素极大地制约了行星轮系齿轮传动的性能,也是我国自动变速器自主研发滞后的一个重要因素。

图1 螺旋内齿圈

由于螺旋内齿的结构限制,高效的滚齿加工方法无法应用到其加工过程中,目前螺旋内齿圈的制造主要有插齿、剃齿、螺旋拉削、车齿等几种方法。其中,插齿精度一般可达IT7~8,但加工的效率略低^[2];剃齿用于齿形精加工但缺少粗加工能力;车齿^[3]虽然有100年历史,不过在近几年才开始逐渐得到应用,工业应用尚不成熟;相比之下,螺旋拉削^[4]由于加工运动简单,确保了非常高的加工效率且加工精度可以稳定达到IT6,非常适合于大批量的变速箱系列化螺旋内齿圈的加工。但为了保证螺旋内齿圈的加工精度,螺旋拉刀的刀齿结构十分复杂,刀具整体体积较大并需要采用特殊材料及制造工艺,制造难度极大,目前只有NACHI, Mitsubishi, Forst, Arthur Klink, Federal Broach等厂商具备生产能力。受制于该刀具的价格、使用中需要的刃磨操作等,该刀具的自主制造能力成为一种迫切需求。本文就螺旋内齿圈拉刀的结构和工作原理进行了详细分析,对其制造中涉及到的数学问题如干涉回避、前刀面刃磨、切削刃成型磨削等进行了简述,并对其粗切段和精切段的加工流程进行了分析与设计并给出了优化的加工走刀路径,同时指出了两种可行的在机检测方法。最后通过实物的试磨对本文提出的螺旋内齿圈拉刀制造方法进行了验证。

1 螺旋内齿圈拉刀的结构分析

1.1 拉刀的基本结构与加工原理

螺旋内齿圈拉刀的基本结构如图2所示^[5]。加

工中,拉床夹头加持刀具前柄,相对工件做进给运动。首先将刀具穿过有预导结构(孔)的工件,通过刀具前导部分进行自定位,然后由刀具切削部分的一系列切削齿逐渐切出目标廓形,最后由校准部分对已加工廓形进行回弹变形的消除来保证最终的廓形精度。由于切削过程中进行切削的刀齿完全被工件包围,切屑无法排除,因此需要容屑槽结构来对切屑进行存储从而保证切削过程的顺利进行并保护已加工表面的质量。拉削的运动过程决定了工件的成型方式,拉刀上所有切削齿的运动轨迹在末端投影的包络轮廓等同于工件待加工的目标廓形,所以,拉刀是面向加工对象来设计的。首先,拉刀切削齿的廓形要根据工件的加工廓形来设计;其次,拉刀的材料和切削齿的齿升量分布以及刀齿的切削组合形式需要依照工件的材料和结构以及加工精度要求来考虑。刀具的材料多为PM-HSS,硬度约为64~67HRC。

图2 拉刀基本结构

1.2 螺旋内齿圈拉刀的独特结构

1.2.1 螺旋容屑槽

螺旋内齿圈加工使用的拉刀与传统螺旋拉刀的主要不同在于其采用了多头螺旋容屑槽结构。不同于传统环型容屑槽结构中刀齿以环为单位同时切入或切出,容屑槽的螺旋结构保证了切削齿在刀具的轴向运动中连续的切入和切出工件。因此,螺旋容屑槽结构有效地减小了同时参与切削齿数的变化,从而减小了拉削过程中拉削力的波动,增强了拉削断续切削过程的稳定性。同时,螺旋容屑槽保证了齿顶切削刃能够逐渐参与切削,从而切屑的变形能够得到释放而不会对已加工表面产生挤伤等。此外,螺旋容屑槽结构对于切屑的卷曲和排除具有良好性能,所以传统切削齿的顶断屑槽不再需要。相应地,螺旋型容屑槽的独特结构从根本上决定了拉刀的制造及前刀面刃磨的方法不同于传统环型容屑槽拉刀。

1.2.2 螺旋内齿圈拉刀粗切段组合形式

由于螺旋内齿圈对于齿顶圆、渐开线廓形和齿根圆弧都有具体的形状与精度要求,因此螺旋拉刀采用分层轮切方式来进行拉削加工^[4]。目前常用的两种粗切段结构如图3a和图3b所示,粗切段对齿圈毛坯完成近似齿槽廓形和齿顶圆及齿顶倒角结构的切削,仅在最终齿形方向上保留指定加工余量,在后续的廓形精切段完成加工。在粗切段中,前部切削齿廓形与目标粗切段切削廓形一致,仅在半径

方向通过齿升量控制,逐渐趋于完整;后半部分切削齿廓形齿根部有修瘦,从而减小与工件已加工表面之间的摩擦;与此同时,齿顶圆环状切削齿(齿顶倒角切削齿)与廓形切削齿进行交替切削以保证获取内齿圈齿形与齿顶圆之间较高的同心度。这里,倒角切削齿可以安置在齿顶圆切削齿的后续位置(图 3a),亦可设计放置在粗切段的最前段(图 3b)。

值得注意的是整体粗切段切削齿的齿升量并非保持固定,特别是局部的无齿升量齿形成了浮动齿布局,能够对刀齿的损坏进行容错性补救。此外,齿顶圆切削段和倒角切削段都包含了有齿升量的粗切和无齿升量的精切两个阶段,是独立于整体的廓形切削齿升量分布结构的。因此,这些结构在进行螺旋容屑槽加工和前刀面刃磨时都需要分别得到保证。

图3 螺旋内齿圈拉刀粗切段组合形式

1.2.3 精切齿工作形式

螺旋内齿圈的齿形精度要求和齿向精度要求由刀具后部的齿型精切段保证。使用中,螺旋拉刀包括精切段与粗切段一体的整体式结构和粗切段刀体与精切段分离的装配式结构。整体式拉刀在制造过程中无需考虑不同部件之间切削齿廓形的螺旋线对齐刀问题,但粗切段和精切段螺旋容屑槽的导程需要保持一致。装配式拉刀在制造过程中需要特殊的工装来保证各部件之间螺旋廓形的对齐,并且需要采用修配法来调整精切段的位置来保证刀具的加工精度。但由于精切段可以采用不同于粗切段的容屑槽导程,因此可以对精切齿在齿侧方向的切削性能进行优化。同时,由于精切段的使用寿命一般长于粗切段,所以精切段可以重复利用从而降低成本。

切削齿的分布结构如图 4 所示:最前端是 1 到 2 排侧刃为负前角的引导齿($A-A'$),保证齿圈从粗切段平稳地进入到精切段;紧接着廓形切削刃前角为正侧的切削齿($A'-B'$)进行切削。每齿切削余量通过法向弧齿厚来控制,对应的分度圆切削余量从 $24\text{ }\mu\text{m}$ 到 $10\text{ }\mu\text{m}$ 逐渐减小,并在末端保留 1~2 排无切削量的切削齿,即廓形精切齿。与此同时,另一侧

的齿形保持 0° 后角且无齿升量,不参与切削但是对于当前齿槽的切削进行支撑和引导;接下来,侧刃前角为负一侧的切削齿开始进行切削而另一侧则退出切削并起到支撑与引导作用。每齿的切削余量从 $20\text{ }\mu\text{m}$ 到 $3\text{ }\mu\text{m}$ 逐渐缩小,并在最末端保留 1~2 排齿形成当前侧廓形对应的精切齿。

图4 螺旋拉刀精切段切削原理

基于螺旋内齿圈拉刀粗切段和精切段的结构分析可知,整个齿圈的加工经历了齿顶圆切削齿、齿顶倒角切削齿、齿形粗切齿(修瘦与无修瘦)以及左

右齿形切削齿的分别作用。由此可见,螺旋内齿圈拉刀是一个复杂的切削过程的集成实现载体,其结构复杂,制造难度大。

2 螺旋内齿圈拉刀制造过程相关问题分析

在螺旋内齿圈拉刀的制造过程中,螺旋容屑槽前刀面的刃磨、带后角的精切齿切削刃磨削成型、粗切段切削齿与齿顶圆切削齿之间的干涉和精切齿结构加工中干涉的避免这4个子问题都需要根据螺旋内齿圈拉刀容屑槽、切削齿的结构及其组合形式进行准确的数学建模来进行分析与求解。

2.1 螺旋容屑槽前刀面刃磨

螺旋容屑槽前刀面的刃磨是保证刀具切削刃锋利、延长刀具使用寿命的重要操作之一,一般利用CBN薄片砂轮进行磨削加工。由于螺旋拉刀切削齿的齿升量在径向存在变化,因此砂轮在保证螺旋线走刀轨迹的同时,在径向上也需要保证刀具半径的一致变化,即砂轮相对于刀具的运动轨迹为一条半径逐渐变化而导程固定的螺旋线。因此,刃磨机床需要具备两直线轴和绕其中一直线轴回转的三轴联动能力。为了保证前刀面获得理想的廓型并得到预期的设计前角,砂轮需要根据螺旋内齿圈拉刀的结构参数及砂轮结构参数来准确计算出合理的姿态设置角度。

为了保证前刀面的磨削表面质量,如图5a所

图5 螺旋容屑槽前刀面磨削要求

示,要求砂轮单侧参与前刀面的成型磨削,且磨削从齿顶向齿根进行。同时,砂轮的磨削工作部分要求限制在其外部的环状部分,从而确保加工过程砂轮与前刀面的平稳接触并使得砂轮磨损均匀以延长其使用寿命。需要注意的是,刃磨得到的螺旋前刀面并非一个理想直纹面,而是一个不规则的空间螺旋面。因此等效前角需要通过前刀面在轴剖面内的曲线进行近似的评估(图5b)。另一方面,考虑到操作人员的安全,要求砂轮切入工件时的速度必须远离操作人员。所以左旋和右旋拉刀的刃磨砂轮设置位姿并不对称,而是分别如图5c和图5d所示。对于左旋刀具,砂轮设置的偏转角度略小于沟槽螺旋角以保证砂轮切入侧能贴合前刀面,而对于右旋刀具,砂轮偏转角则略大于沟槽螺旋角以确保砂轮切出侧与前刀面分离。

由前述分析可知,螺旋拉刀前刀面刃磨实现的关键在于在保证磨削工艺的前提下,计算合理的砂轮设置姿态以保证设计前角的获取。该问题等价于以砂轮空间姿态为变量,基于包络原理计算出砂轮刃磨的等效前角,然后调整砂轮姿态以使得等效前角逼近设计前角的数值搜索问题。求解中需要保证砂轮与当前齿槽前一齿之间无干涉存在。这是因为一般砂轮在容屑槽中的设置角度远大于设计前角,即有向前一齿背贴合的趋势。因此,为了防止这种干涉,需要根据刀具的结构来对砂轮尺寸进行选型。以分度圆直径100 mm,容屑槽深度5 mm,齿槽宽9 mm,螺旋角为 10° 的右旋螺旋内齿圈拉刀为例,其刃磨的砂轮半径(倒角圆弧半径1.25 mm)与砂轮设置姿态之间的关系如图6所示。在设定的砂轮偏转角度下,砂轮半径越大则需要的倾斜角度就越大;砂轮给定的偏转角度越大,相应的倾斜角度也要增大。当倾斜角度超过一定程度后将造成砂轮与前一齿的干涉,如图中“□”所示的砂轮安装位姿。实际磨削中,在维持一定的磨削速度前提下,大的砂

图6 砂轮半径与砂轮设置姿态之间的关系

轮半径对应较低的主轴转速,并能够延长砂轮的使用寿命,因此建议优先选择大可行的砂轮半径,即对应较小的安装偏转角度。

2.2 螺旋拉刀精切齿切削刃磨削成型

由螺旋拉刀的工作原理可知,齿形精切齿的切削刃在空间的运动轨迹是一系列与目标内齿圈有加工余量偏移的螺旋渐开面,同时精切齿在侧刃都有 0.5° 到 1° 的后角来保证加工表面质量,因此磨削加工必须精确地保证切削刃在空间的位置精度并形成指定的后角。图7所示为精切齿切削刃的成形原理,这里切削刃是指理论加工齿面,即标准螺旋渐开面,与刃磨加工前刀面的空间交线。考虑到可制造性,齿侧曲面设计为一螺旋面,其螺旋角等于标准齿形螺旋角经侧刃后角入体原则修正后的角度。因此,磨削加工的砂轮廓形面向该螺旋曲面进行计算即可。但是该螺旋面必须基于切削刃曲线求解,所以切削刃曲线的精确求解是精切齿磨削加工的关键。

图7 精切齿切削刃形成原理

前面已经指出切削刃是前刀面与理论齿形螺旋面的交线。前刀面刃磨原理表明前刀面是由磨削砂轮与前刀面的接触线在空间做螺旋运动扫掠出的一个螺旋面。该接触线可以基于空间包络原理得到精确求解。最后,切削刃可以通过前刀面与齿侧面螺旋面按照半径对应的螺旋线进行相交求解。

2.3 螺旋拉刀粗切部分交替切削齿加工的干涉问题

螺旋拉刀粗切段中齿形切削齿和齿顶圆与齿顶倒角切削齿为交替切削结构,要求砂轮在对粗切齿的齿侧进行完整成型磨削的同时不会干涉到前后相邻的齿顶圆与齿顶倒角切削齿。如图8所示,由螺旋廓形成型加工原理^[6-8]可知,切削齿左右两侧与砂轮的接触线为一对中心对称的空间曲线。而切削齿

左右两侧的有效曲面范围由于容屑槽的螺旋角与廓形轨迹非正交而并不对称。因此左右齿侧面加工的砂轮运动行程需要基于接触线 L 和 R 分别进行确定。由于砂轮需要一次性对两侧面进行加工,所以两行程的并集 PQ 才是保证两侧切削齿面得到完整加工的最小运动行程。图中 EF 为砂轮从接触到前一齿齿背后到后一齿齿顶的运动范围,这里 EF 必须包含 PQ ,否则无法实现当前结构的加工。其中 EP 和 QF 为磨削中的砂轮越程量,这对于砂轮对刀位置的容错和调整有重要意义。

图8 交替切削齿磨削干涉情形

砂轮的尺寸和安装螺旋角直接决定了磨削接触线的空间形态,尤其是砂轮的尺寸直接决定了 PQ 的是否可实现。因此,为了避免齿侧磨削过程正中的干涉,需要依据具体的拉刀结构参数来选择合理的安装角度和砂轮尺寸范围。同时考虑到砂轮修形带来的时间损耗和砂轮更换对于对刀位置的精度影响,应尽可能采用大的砂轮半径来提高砂轮的使用寿命。

2.4 螺旋拉刀精切齿的切削齿刃磨干涉问题

如图9所示,前后切削齿之间的运动轨迹清晰地表明了螺旋拉刀精切段结构切削齿在廓形方向的加工余量偏移结构。同时,螺旋角修正后的砂轮走刀路径用于实现切削齿后角前后刀齿前后之间的距离由螺旋容屑槽结构确定,所以与螺旋拉刀粗切段加工的加工类似,砂轮的外径、安装角度和走刀行程必须得到严格的控制。此外,切削齿两侧需要分别加工,即砂轮走刀行程 PQ 由单侧砂轮接触线范围确定,而且砂轮必须进行一定尺寸的修薄来防止一侧参与加工时另一侧砂轮干涉存在。这时 PQ 必须位于砂轮与磨削对侧前一齿齿背接触的位置 E 和砂轮与磨削侧后一齿切削刃接触位置 F 之间,否则砂轮与前后的切削齿将发生过切。

图9 精切段铲背干涉情形

3 螺旋拉刀制造关键工艺问题

3.1 螺旋拉刀切削齿定位坐标系构建

螺旋拉刀的切削齿种类繁多,为实现每个切削齿廓形无干涉地精确加工,必须保证砂轮能准确地执行每一个切削齿的磨削行程。不同于传统的环型容屑槽拉刀,螺旋容屑槽和切削齿的螺旋轨迹这种双螺旋的结构决定了螺旋拉刀切削齿的分布形态。

切削齿在刀体表面的分布位置与切削齿在机床中的位置关系如图10所示,通过将刀具表面沿节圆柱面展开,可以将切削齿按照所在螺旋沟槽的位置进行分区和定位。如图10所示,螺旋沟槽I, II, III, ...与沟槽I之间的位置关系,以及同一沟槽中两齿之间的相邻位置坐标关系和同一齿对应不同排之间齿的坐标关系很容易得到计算。图中D齿,为第3螺旋沟槽中第3齿的第6排齿。所以D齿的位置就可以通过以下路径得到计算: I→T→III→D。

图10 刀具切削齿位置计算关系

3.2 螺旋拉刀粗切段磨削流程组织

螺旋拉刀粗切段切削齿的种类及分布已经在第

1.2.2节中进行了介绍,并且不同切削齿在磨削加工过程中与其他切削齿之间的无干涉条件在第2.3节中也进行了讨论。考虑到切削齿的数量巨大及分布模式复杂,合理地组织加工流程和对加工路径适当地优化对于为提高拉刀制造效率十分必要。

如图11所示,基于粗切段各种切削齿的分布模式,从材料去除效率角度考虑,粗切段切削齿的成型磨削可以划分为4个子过程:① 砂轮采用标准廓形对刀具进行磨削行程逐渐扩展的往复磨削,径向进给只至齿顶倒角切削齿外径附近;② 粗切段前部标准廓形齿进行往复磨削,径向进给至完成齿形加工;③ 粗切段后端廓形修瘦齿进行逐齿的径向进刀加工,每齿完成后切换到下一齿。这时需要保证砂轮与前后的齿顶圆(齿顶倒角)切削齿无干涉;④ 后部齿顶倒角切削齿的齿槽廓形进行径向进给的往复通磨。这里由于廓形修瘦齿齿根部不参与拉削,所以通磨带来的廓形改变可以不考虑。该加工流程保证了砂轮走刀路径尽可能的短、路径转换方向次最少,并且最小化了砂轮廓形改变次数,便于砂轮走刀路径的模块化编程。

图11 螺旋拉刀粗切段加工工艺路线

3.3 螺旋拉刀精切段磨削流程及走刀路径规划

由螺旋拉刀精切段的结构可知切削齿左右侧曲面位置并不对称,而且左右切削刀的后角要求也不一致。此外,刀齿数量很多,每齿逐个加工效率太低。所以,必须通过优化加工工序和走刀路径来提升螺旋拉刀精切段的制造效率并保障加工精度。如图12所示,将精切段的加工过程划分为3个阶段:① 依照C-C'截面的廓形对刀体进行开槽,直至达到C-C'廓形的要求精度,用于形成末端校准齿的精确刀型;② 从刀齿结构的台阶形结构入手,对切削齿的左右两侧分别加工。进行目标廓形的精磨以保证0°后角要求的切削齿成型;③ 对于有后角要求的切削齿进行逐齿的铲背磨削。需要注意的是,流

程②和③必须采用相同的对刀点位置,从而保证切削齿之间精确的相对位置。

图12 螺旋拉刀精切段加工工艺路线

其中,由于精切段的台阶型结构和刀齿的磨削工艺要求,加工阶段II中的材料去除包括粗、精两个阶段。切削齿两侧即钝角侧和锐角侧分开进行加工。其中粗加工的砂轮走刀路径规划如图13a所示。砂轮从齿槽中心位置逐渐向外进刀,同时每一走刀行程依据对应的有拉削余量的切削齿位置进行相应的缩减,最终形成台阶型运动路径。精磨过程为了保证 0° 后角切削齿的刀刃锋利,砂轮从后向前进刀磨削。如图13b所示,砂轮贴合刀齿的台阶形态进行走刀。类似地,切削齿的后角铲背磨削也是贴合刀齿的台阶型进行走刀。但是每齿单独磨削,其磨削行程需要保证后角的形成,并且避免前后切削齿之间的干涉。

图13 螺旋拉刀精切段台阶结构加工走刀路径

3.4 螺旋拉刀制造过程在机检测方法

螺旋内齿圈拉刀的制造,在进行砂轮对刀后,直至完成所有切削齿的加工之前都需要尽可能地避免对刀点的调整,从而避免对刀点的改变引起的切削齿之间的相对位置误差进而导致的工件加工失败等。在保证同一对刀点对砂轮修形和各种齿形加工的前提下,目标齿形的精度控制及相应的加工余量

分配需要通过在机检测的方法来调整实现。尽管螺旋拉刀的刀齿结构类似于斜齿轮,但由于刀齿廓形存在加工余量,同时考虑到制造过程中质量控制的实现,齿轮检测采用的跨棒距检测和在机测头测量方法以及相应的数据处理算法需要进行适当的修改才能得到应用。

切削齿的齿形精度通过砂轮在径向上的加工余量控制来保证实现。因此对于无后角的粗切段刀齿廓形,可以直接采用齿轮检测方法。但是,测头(量棒)与刀齿的理论接触点应当保证位于当前切削齿的有效廓形范围内,而且齿根修瘦的廓形段应得到回避。对于精切段齿形的加工中的检测与调整环节,需要结合制造工艺流程并尽可能简洁精确。结合图12中精切段的制造流程:阶段I中,检测C-C'处的廓形对目标廓形进行精度控制;阶段II中,A-A'和B-B'处的廓形检测可以判定左右侧精切齿的加工余量是否设计满足要求,并依此进行适当的修正余量计算;阶段III中,刀齿铲背后齿侧结构发生改变,因此量棒与刀齿面接触方式失效,所以跨棒距检测模型不成立。这时需要基于测头进行检测并通过相应的数据处理方法获取最终精度检测报告。

在铲背操作前,螺旋拉刀精切齿的分布结构等价于一系列变位系数不同的斜齿对,所以跨棒距检测(图14a)和在机测头测量检测都能够准确地获取检测报告。对于跨棒距检测方法,量棒的直径选取需要保证量棒与齿面的有效接触范围。在机测量方法,需要保证测头的检测位置发生在切削齿的有效侧面范围内。因此,每一齿面对应的测头检测范围应如图14b所示,轴向上位于切削齿左右侧轴向投影的交集内,径向上测头的直径应该保证在齿根有足够的空间进行运动。

(a) 螺旋拉刀跨棒距检测

(b) 螺旋拉刀检测测头运动范围

图14 螺旋内齿圈拉刀在机检测方法

4 螺旋拉刀制造 CAM 软件及实验验证

在综合考虑螺旋内齿圈拉刀的结构参数、齿形分布以及需要的数学问题求解的基础上，结合制造工艺流程，开发出一套针对螺旋内齿圈拉刀切削齿磨削的 CAM 软件。并通过与 SIEMENS 840D 数控系统通信，保证了对刀信息的唯一以及在机操作的实现。其功能包括：螺旋内齿圈拉刀的前刀面刃磨砂轮设置姿态计算与磨削路径生成；螺旋拉刀粗切段切削齿廓形磨削所需砂轮廓形生成、修形和复合磨削路径生成；螺旋拉刀精切段廓形磨削砂轮廓形计算和磨削路径生成；在机检测路径生成与检测报告生成；精切段加工进程实时显示。

4.1 螺旋内齿圈拉刀 CAM 关键参数输入界面

由于螺旋拉刀结构复杂，所以刀具结构参数的输入必须合理的设计以保证参数能够得到准确并完整的输入，从而满足制造过程的数学建模需要。其中最核心的结构参数输入如图 15 所示：1 区表示了齿形的基本参数如法向模数、螺旋角、端面齿数、法向压力角、法向弧齿厚等；2 区为螺旋容屑槽结构参数输入，主要包括了前角、螺旋导程、旋向、容屑槽深度、沟底圆弧半径等；3 区为最关键的精切段切削齿加工余量分布的台阶结构输入，主要通过齿序号对应法向弧齿厚和左右

侧切削刃的后角来表达。每齿的切削余量和左右位置都可以明显的观察到。此外，跨棒距的检测推荐值也依据该数据进行计算；4 区为切削齿刀型的整体结构，包括了有效的渐开线工作范围、齿顶倒角圆半径及齿顶倒角切削齿的齿槽对应的法向弧齿厚参数等。

图 15 螺旋内齿圈拉刀 CAM 软件刀具结构输入

4.2 螺旋拉刀制造验证

基于 QMK008 万能数控拉刀磨床，通过螺旋内齿圈拉刀制造 CAM 软件分别对一把螺旋拉刀的粗切段和另一把螺旋拉刀的精切段实现了加工。粗切段和精切段加工对应的螺旋拉刀的齿形参数和螺旋容屑槽结构参数分别见表 1 和表 2。

表 1 螺旋拉刀齿形参数

制造对象	端面齿数	轴向齿数	法向模数/mm	螺旋角(°)	旋向	法向压力角(°)	法向弧齿厚/mm
精切段	98	19	1.379 548	22.556 329	右旋	19	2.296
粗切段	36	56	1.57	22.556 329	右旋	20	2.466

表 2 螺旋拉刀容屑槽参数

制造对象	头数	导程/mm	旋向	齿顶厚/mm	容屑槽深度/mm	容屑槽沟底圆弧半径/mm
精切段	4	50.80	左旋	4.6	5.6	1.5
粗切段	4	44.44	左旋	3.8	4.2	1.5

螺旋拉刀粗切段螺旋沟槽加工后的毛坯如见图 16a。加工后得到的廓形粗切齿、廓形修瘦切削齿、齿顶圆切削齿和齿顶倒角切削齿见图 16b，交替分布的粗切齿和齿顶圆切削齿以及齿顶倒角切削齿结构正确。螺旋拉刀精切段毛坯如图 17a 所示，经过铲背后的精切齿两侧分别见图 17b 和图 17c。其中切削齿左右侧面深色部分为铲背操作未磨除的切削刃局部表面。

4.3 在机检测验证

螺旋拉刀精切段切削齿通过机床配备的雷尼绍

测头对齿槽进行逐个的左右侧齿面的齿形和齿向检测。检测结果并未完全照 ISO 1328 的规定检测标准呈现，而是突出表现了切削齿的位置形态分布。图 18a 为切削齿廓形的分布，基本遵循了精切段切削齿的结构。由于第一齿是导向齿，检测区域的齿面经过严重负倒角修形，所以廓形偏差很大。其余齿形基本分布在平均线附近。图 18b 中为切削齿侧面的螺旋线形态，整体分布依然遵循了精切段切削齿的分布结构。其中，左侧 9~15 齿的齿侧廓形可以观察到后角。但是，由于测量功能是后期在机床中

附加的,与机床自身结构和运动系统存在一定误差,所以测量精度不够理想,需要在后续的机床结构设计中改进。

图 16 螺旋拉刀粗切段制造

图 17 螺旋拉刀精切段制造

(a) 切削齿廓形检测形态

(b) 切削齿螺旋线检测形态

图 18 精切段切削齿检测结果

5 结论

(1) 本文针对汽车自动变速箱用螺旋内齿圈拉削加工使用的螺旋拉刀,首次对其两种粗切段刀齿的组合方式和特殊的台阶型精切段切削齿结构进行了详细的分析和说明。

(2) 对于螺旋拉刀制造过程中需要保证的前刀面的刃磨、有后角要求的精切齿加工、粗切段中交替结构下切削齿加工中的干涉回避和精切齿铲背加工中砂轮的干涉等问题,结合磨削工艺需求,给出了数学建模角度的分析。

(3) 对于螺旋拉刀粗切段和精切段的加工,根

据刀齿的具体结构和刀齿的分布形式制订了合理的加工工艺流程,并对精切段的加工规划优化的台阶型走刀路径。同时,指出螺旋拉刀切削齿齿形加工精度控制的跨棒距和测头两种在机检测方法使用的注意事项,并结合制造过程进行了简洁的应用说明。

(4) 通过设计合理的人机交互参数输入界面,并综合考虑制造过程的数学问题求解和工艺约束,结合西门子 840D 数控系统,开发出螺旋内齿圈拉刀制造 CAM 软件。

本文对螺旋内齿圈拉刀的结构及制造方法进行了全面地解析,提出了关键问题的解决要点并给出了制造解决方案,并通过某尺寸规格的螺旋拉刀的磨削加工,表明该解决方案对于实现螺旋内齿圈

拉刀的自主制造有重要的指导作用。

参 考 文 献

- [1] 吕兵, 龙运越. 2013 年中国汽车变速器行业发展评析[N]. (2014-10-09) <http://www.chinaat.net/news/show.php?itemid=25>.
LÜ Bing, LONG Yunyue. Evaluation of the development for automotive transmission industry of China in 2013[N]. (2014-10-09) <http://www.chinaat.net/news/show.php?itemid=25>.
- [2] 何勤松. 内齿圈加工的革命——拉削工艺及刀具[J]. 汽车工艺师, 2015(2): 60-62.
HE Qinsong. The revolution of ring gear manufacturing: Processing of broaching and the tool[J]. Automobile Technologist, 2015(2): 60-62.
- [3] PITTLER W, ADAMS G. A gear-like method of cutting that cut occurs on the cutting teeth edge of the front flank of the cutting tool: German, 243514 [P]. 1912-02-16.
- [4] SUTHERLAND J W, SALISURY E J, HOGE F W. A model for the cutting force system in the gear broaching process[J]. International Journal of Machine Tools Manufacturing, 1997, 37(10): 1409-1421.
- [5] 袁哲俊, 刘华明. 金属切削刀具设计手册(单行本)拉刀[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
YUAN Zhejun, LIU Huaming. The design handbook of metal cutting tool (single) broach[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [6] XIAO D, LEE C. A contact point method for the design of form cutters for helical gears[J]. Journal of Engineering for Industry, 1994, 116: 387-391.
- [7] SHI Z D, MALKIN S. Valid machine tool setup for helical groove machining[J]. Journal of Manufacturing Process, 2004, 6(2): 148-154.
- [8] SHETH D S, MALKIN S. CAD/CAM for geometry and process analysis of helical groove machining[J]. Annals of the CIRP, 1990, 39(1): 129-132.

作者简介: 贾康, 男, 1987 年出生, 博士, 助理研究员。主要研究方向为螺旋内齿圈拉刀制造、五轴加工路径规划、智能制造、大尺寸空间精密测量技术。

E-mail: jiakang@xjtu.edu.cn

洪军(通信作者), 男, 1968 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为数字化设计、人机界面设计、数字化装配技术以及服役状态在线监测技术。

E-mail: jhong@xjtu.edu.cn