直角铣头结构分析及比较

张慧芳
（沈阳机床（集团）有限责任公司 辽宁 沈阳 110141）

摘要：自动直角铣头是一种特殊的机床附件，广泛应用于数控镗铣床和镗铣加工中心，以扩大机床的加工范围。自动直角铣头可以实现主轴轴线的纵向和横向转换，可完成自动更换工件的正、侧面加工，减少工件夹紧次数，大幅提高加工效率。本文针对目前市场中龙门镗铣加工中心常用的两款自动直角铣头进行结构、液压原理及性能等方面的对比分析。

关键词：直角铣头；镗铣加工中心；端齿盘内置；端齿盘外置

1 端齿盘在直角铣头中的作用

为提高加工效率，满足加工过程中加工不同角度侧面的要求，龙门式数控镗铣加工中心在实际使用中经常配置自动直角铣头，其卧轴可以沿着机床主轴轴线进行 360° 旋转，由于龙门式数控镗铣加工中心的主轴与 Z 轴都是竖直方向，所以直角铣头的卧轴旋转被称为 C 轴旋转。自动直角铣头的 C 轴旋转分度的角度精度和位置精度是决定其所加工零件的是否满足精度要求的关键，而决定角度精度和位置精度的关键部件就是其使用的端齿盘。

目前龙门式镗铣加工中心使用的 C 轴旋转分度传动结构主要分为设计在机床本身滑枕内部和直角铣头内部两种。由于当前龙门镗铣加工中心市场上滑枕内部设置 C 轴旋转分度结构的机床占比极少，为保证自动直角铣头更高的适配性，通常 C 轴旋转的驱动结构都设计在自动直角铣头内部。

因此，目前市场上主流的自动直角铣头的内部传动通常包括主轴旋转传动和 C 轴旋转分度传动。其中主轴旋转传动链主要由锥齿轮、轴承、主轴等机械零部件组成。其内部的一对锥齿轮可将竖直向下的旋转运动转变为水平方向的旋转运动。C 轴分度传动链同样由这对锥齿轮实现，使卧轴部分整体围绕 Z 轴旋转，其分度精度则由上下啮合的一对端齿盘决定。端齿盘分为上下两个齿盘，上齿盘安装在自动直角头头体的固定部分，始终保证与加工中心的滑枕铸件相对固定，下齿盘则安装在自动直角铣头下头体的可旋转部分，可以随之进行旋转。上下齿盘相对旋转的角度也就是直角铣头卧轴分度的角度，所以齿盘的分度精度决定了卧轴的分度精度。

在加工中心在加工过程中，上下端齿盘需要始终处于啮合夹紧状态。因此，在上下端齿盘啮合面位置需要设置压力检测或者位置检测开关，从而确定上下端齿盘是否完全啮合。当压力检测开关或位置检测开关给出端齿盘啮合到位信号时，加工中心方可进行加工指令。由于在 C 轴分度旋转时需要上下端齿盘完全脱开，所以，在啮合面处设置位置检测开关可以更好地反馈上下端齿盘啮合到位或者松开到位。

由于上下端齿盘之间既有垂直方向的相对移动，又有以加工中心立主轴为轴线的相对旋转运动，并且还要配置检测开关装置，所以这决定分度精度端齿盘在自动直角铣头中的

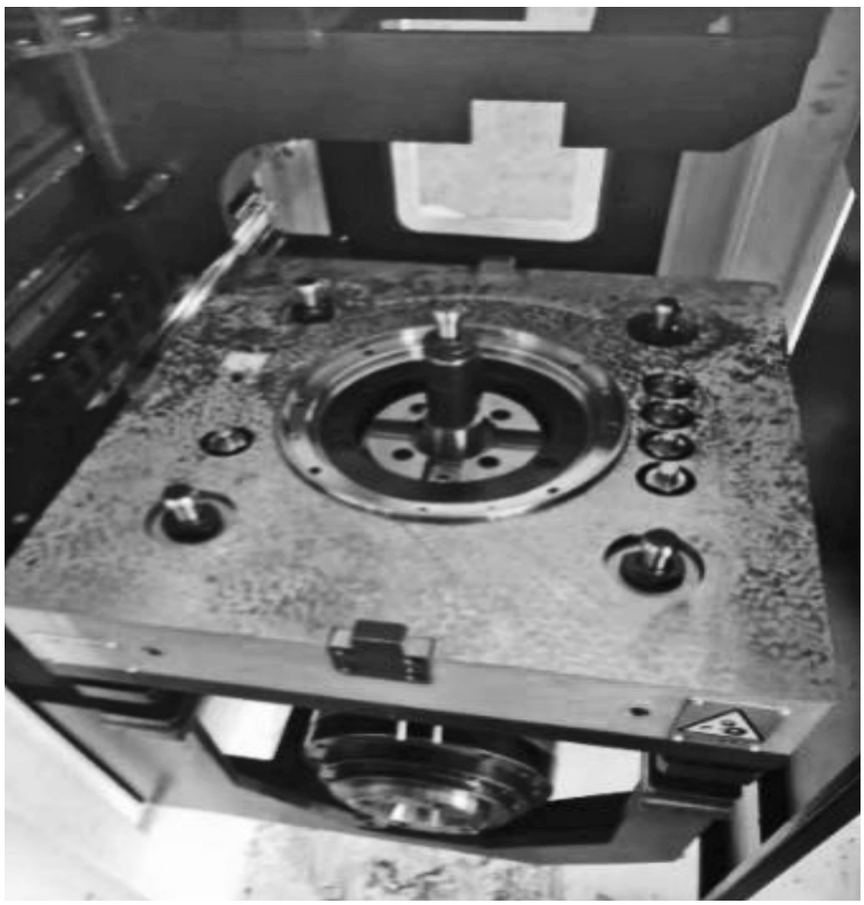

图 1 直角铣头上安装的快换接头

67-96 综合 9月中 第26期 .indd 79 2022/3/10 16:28:03

安装位置，直接决定了铣头结构的复杂程度。目前，按照端齿盘安装位置不同，自动直角铣头主要分为端齿盘内置和端齿盘外置两种结构。

2 端齿盘内置结构

以德系、美系为代表的龙门镗铣加工中心在选配自动直角铣头时，主要采用端齿盘内置结构的铣头。这种结构自动直角铣头的上连接盘固定安装在机床的主轴箱上，机床提供的液压、气动控制管路与上连接盘各端口对接，通过控制系统完成对下头体的各种动作的实现。下头体的松开、夹紧，端齿盘的松开、夹紧、卧轴的松刀均通过液压控制实现，通常铣头还具有卧轴中心吹气、卧轴外冷等功能。

全自动直角铣头由上部连接盘（内置抓取模组）和下部自动头体两部分组成。直角铣头的上部连接盘固定安装在龙门式数控镗铣加工中心的滑枕下端，直角头自动松夹由松开直角头和夹紧直角头两个液压动作组成。连接盘内部的抓取模组由四个夹头油缸组成。夹头油缸直接带动四个卡爪的松开和拉紧。夹头油缸均匀布置在连接体的四个对称位置，为直角铣头的装卸提供驱动力，从而实现松头和夹头的动作。夹头油缸具有机械自锁功能，可以保证机床在突然断电、急停或发生其他突发情况时，自动直角铣头不会突然掉落。

所有这些动作均需要管路将切削液、压缩空气、液压油输送至直角头上部连接体中。其中，直角头自动松夹的 2 个油路直接通至 4 个夹头油缸处即可，另外其他的动作需要每个管路连接一个快换接头的母接头。相对应位置的直角铣头下头体端面上安装有快换接头的公接头（如图 1 所示）。快换接头的作用是在机床抓取直角铣头时，接通这些流体，使其经过上连接体流动到直角头内部，机床松开直角头时，从上连接体位置断开流体的传送。

下部头体的内部包括主轴旋转传动机构和 C 轴分度传动机构。下头体端面还安装了多个快换接头，这些快换接头可保障自动直角铣头所需的液压、气动功能，主要包括刀具外冷、锥孔吹气、气幕保护、自动松夹刀、c 轴自动分度、直角头自动松夹等。

自动直角铣头的液压原理控制如图 2 所示。附件头具体动作过程为：松、夹附件头动作由安装在连接盘内的 4 个附件头松、夹油缸同时进油或回油实现；松、夹分度用端齿盘动作由安装在附件头体内的 4 个端齿盘松、夹油缸实现，当端齿盘处于松开状态时，机床通过立主轴旋转带动附件头卧轴部分整体旋转，实现卧轴的自动旋转分度，分度精度由端齿盘的分度精度决定，到达预设角度后，端齿盘油缸拉紧，卧轴旋转定位动作完成，此过程中，附件头松、夹油缸始终处于附件头夹紧状态。

刀具外冷指直角头安装刀具进行切削加工时，切削液从直角头端部喷出进行刀具和工件的冷却。锥孔吹气指直角头拆卸刀具后，卧式主轴锥孔中心向外吹气，以确保锥孔清洁，不被污染。气幕保护指在主轴前端外圈，常通以低压气流，以隔绝外部污染空气及冷却水雾进入轴承，从而避免污染轴承，达到延长轴承使用寿命的目的。松刀指通过液压动作推动拉杆向前运动，放松拉爪，最终给刀具拉钉以一定的推力，完成卸刀任务。C 轴自动分度由 C 轴松开和 C 轴夹紧两个液

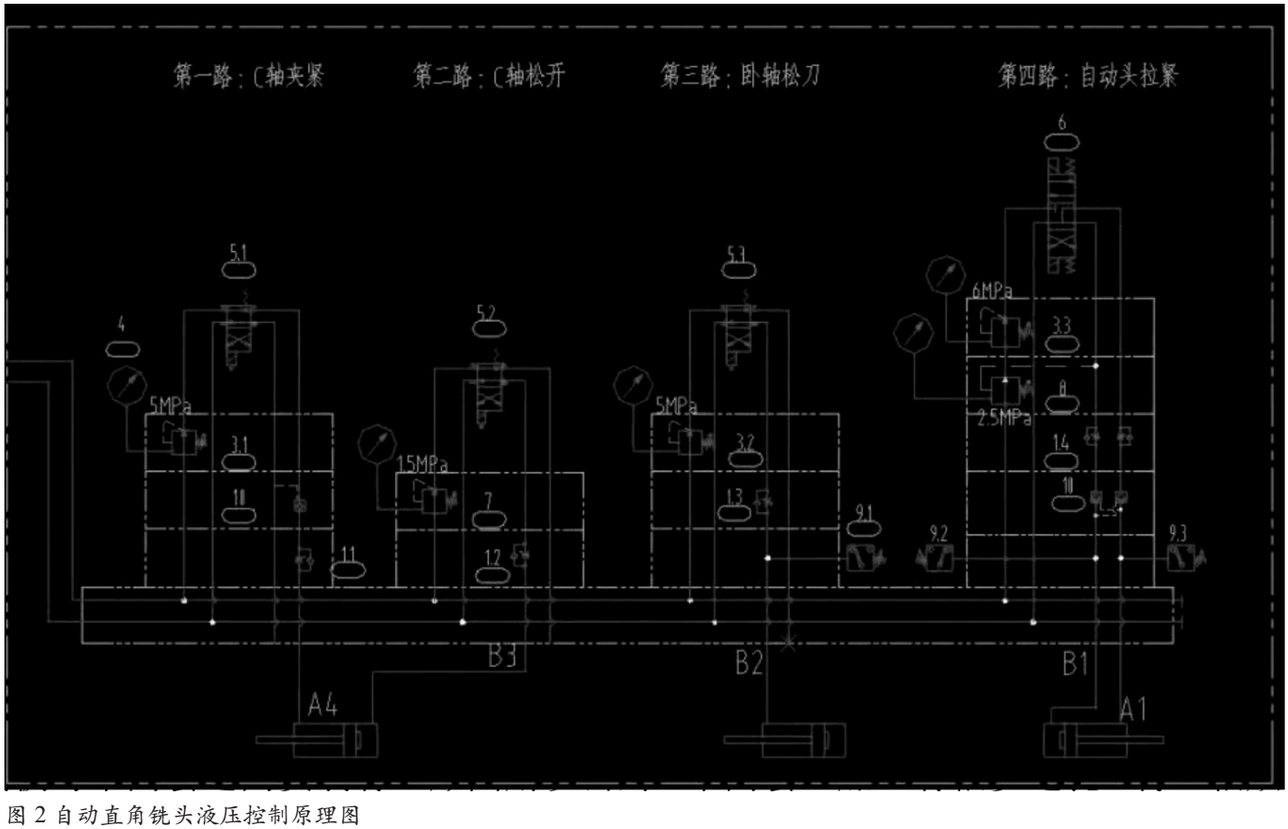

图 2 自动直角铣头液压控制原理图

67-96 综合 9月中 第26期 .indd 80 2022/3/10 16:28:03

压动作组成，接受到 C 轴分度的指令后，先执行 C 轴松开动作，松开到位信号确认后，执行主轴旋转动作，转动到一定角度，执行 C 轴夹紧动作，完成 C 轴分度任务。即根据加工工序要求，围绕机床 Z 轴旋转到不同角度的动作。

各种流体到达直角铣头连接体后，通过加工的通孔到达中间套，直角头安装板与中间套之间安装有 O 形圈用以密封。中间套上加工有很多通孔，将 C 轴放松、夹紧液压油导入相应动作油腔，将锥孔吹气、松刀、刀具水冷导入相应环形油腔，环形油腔间用密封圈密封。气幕的气体导入中间套底端空腔。内套上相应位置的加工孔，将中间套环形空腔及底端空腔的流体导入壳体，其中刀具水冷及气幕导入壳体前端，分别到达最终位置后动作完成。松刀及锥孔吹气导入壳体后端，通过松刀油缸进入最终位置完成动作。

从图中可见，下部头体中心立轴上端面设计有键槽，当铣头被上连接盘夹紧时，加工中心的主轴端面键与图中键槽配合，镗铣加工中心的主轴旋转通过端面键传递给直角铣头的立轴，从而传递给安装在铣头立轴上的锥齿轮，再通过铣头内部与之垂直布置的安装在铣头卧轴上的锥齿轮将垂直方向的旋转运动转变为水平方向的旋转运动，从而实现立、卧轴之间的动力传递。

铣头下部头体中还设计有 C 轴分度传动结构，该传动主要由 C 轴松开、夹紧油缸、一对内外啮合齿轮和一对上下啮合的端齿盘组成，能够实现围绕 Z 轴的 360° 转向。端齿盘内置结构的全自动直角铣头其 C 轴分度结构完全封闭在下部头体内部。

自动直角铣头被上连接盘夹紧后，当 C 轴松开油腔泄压，C 轴夹紧油腔进油，C 轴处于夹紧状态，此时上、下端齿盘啮合，内外啮合的齿轮脱开，立轴的旋转动力通过锥齿轮，用于驱动卧轴旋转，此状态为自动直角铣头的正常加工状态；当 C 轴松开油腔进油，C 轴夹紧油腔泄压，两片端齿盘分开，同时内外齿轮啮合，外齿轮在机床主轴的作用下通过内齿轮驱动 C 轴旋转，根据加工需要待旋转到特定的角度后，再执行 C 轴夹紧动作，由此实现整个 C 轴的分度动作。

通过该动作原理可见，C 轴旋转时的最小分度角度决定于上下啮合的端齿盘的齿数，当端齿盘为 144 齿时，最小分度角度为 2.5°（360°÷144），当端齿盘为 72 齿时，最小分度角度为 5°（360°÷72），即端齿盘齿数越多，最小分度角度越小，C 轴旋转可调角度越精细，但齿数越高的端齿盘价格也越高，所以选择合适的最小分度角度也是自动直角铣头的重要参数之一。

C 轴的松夹和分度是直角铣头的基本功能之一，自动松夹和自动分度功能的实现是全自动直角铣头的关键和难点。端齿盘内置在下铣头体内部，就要求其整体结构必须紧凑，且实用性强，可靠性高。

端齿盘内置结构的自动直角铣头优点显而易见。其全密闭结构可实现绝对防尘，端齿盘被完全保护在头体内部，不易磕伤。同时，在机床装配调试过程中，铣头上母线易调整，在附件铣头自身上下端齿盘结合面精度保证的情况下，只需铲刮铣头与机床滑枕连接的端面即可实现母线的调整。该结构中上下端齿啮合面与铣头卧轴中心距离较短，其刚性以及稳定更好地得到保证。但是，端齿盘内置结构的自动直角铣头由于需要将端齿盘内置且保证其密封性，铣头内部结构较复杂、技术难度高、装配困难，从而导致总体成本较高。

3 端齿盘外置结构

近年来，很多铣头制造厂商为满足机床用户的低成本需求，将自动直角铣头结构进行了简化设计，以将端齿盘外置，取消端齿盘松夹油缸的应用。一般台系、日系的龙门镗铣加工中心较多使用此种自动直角铣头。

这种结构的铣头外观如图 3。其上连接盘与端齿盘内置结构的铣头同样固定安装在机床的主轴箱上，机床提供的液压、气动控制管路与上连接盘各端口对接，通过控制系统实现对下头体的各种动作的实现。但是从其液压控制原理来看，

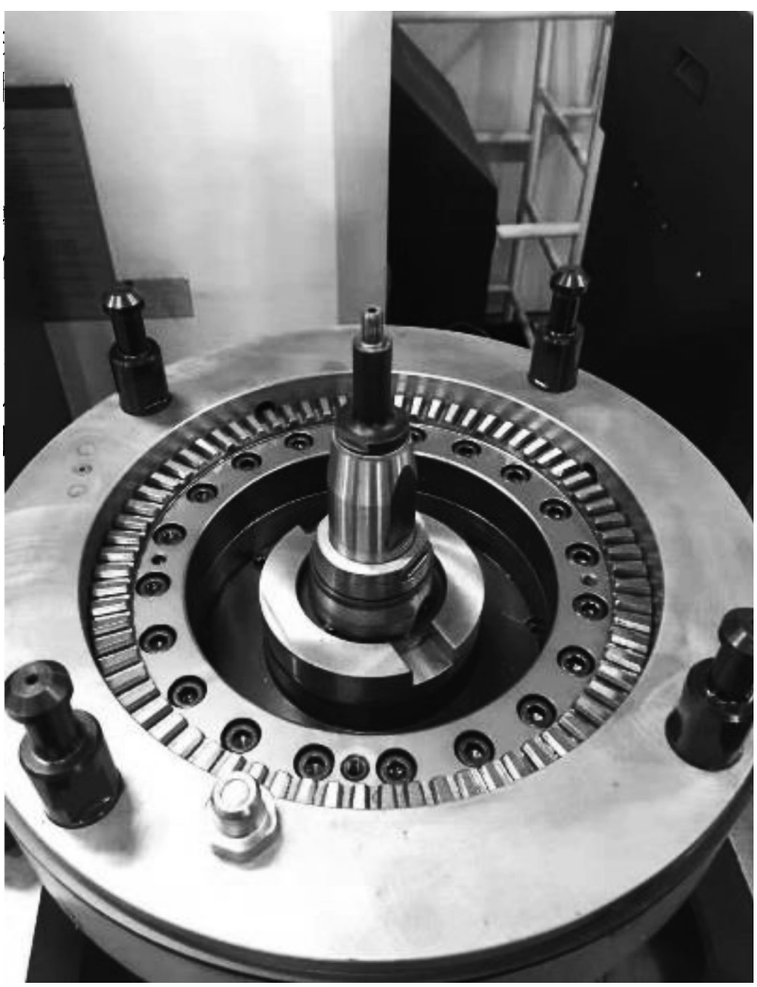

图 3 端齿盘外置结构的自动直角铣头

67-96 综合 9月中 第26期 .indd 81 2022/3/10 16:28:03

其只保留了下头体的松开、夹紧和卧轴的松刀功能，取消了独立对端齿盘的松开、夹紧动作的控制。通常端齿盘外置结构铣头也可以具有卧轴中心吹气、卧轴外冷等功能。

此种铣头具体动作过程为：松、夹附件头动作由安装在连接盘内 4 个的松、夹油缸同时进油或回油实现；当铣头卧轴要实现旋转分度时，给松、夹铣头油缸下达松开附件头动作指令，但油缸无需完全松开，在下头体与上连接盘脱开一定距离时，油缸内设置的位置传感器发出到位信号，表示油缸在此位置时，位于下头体的下端齿盘与位于上连接盘的上端齿盘已脱开，油缸停止动作，此时机床可通过立主轴旋转带动附件头卧轴部分整体旋转，实现卧轴的自动旋转分度，分度精度仍由端齿盘的分度精度决定，到达预设角度后，松、夹附件头油缸拉紧，卧轴旋转定位动作完成。可见，端齿盘内置结构的铣头其松、夹附件头和松、夹端齿盘均由同一套油缸动作实现，只是执行不同功能时其油缸伸出程度不同。

从端齿盘外置结构的自动直角铣头结构和控制动作可以看出，其成本低、技术难度低、装配简单优势明显。但从图 3 可以直观地看出，其端齿盘直接外露，当长时间处于加工环境时，在松、夹附件洗头过程中不易防尘，且可能造成端齿盘磕伤，从而影响分度精度；在装调过程中铣头上母线不易调整，铣头下端齿盘结合面铲刮比较费时费力；其结构造成上、下端齿啮合面到铣头卧轴中心距离较长，导致其刚性以及稳定性相较没有端齿盘内置结构的铣头好。

4 结语

根据两种自动直角铣头的结构分析可以看出，端齿盘内置和端齿盘外置两种结构的优缺点显而易见。端齿盘内置的自动直角铣头结构精度好，刚性高，易调整、防尘好、稳定性高，但结构复杂，装配困难，对制造商要求高，成本高；端齿盘外置的自动直角铣头则在精度、刚性、稳定性和调整难易程度上均略逊一筹，但其结构简单、易于装配，所以可以选择的制造商更广泛、成本优势尤为明显。

综上所述，在自动直角铣头的选用过程中，如果更侧重要求整体的刚性和稳定性，成本足够的情况下，可选用端齿盘内置结构的直角铣头；如果更侧重控制采购成本，则建议选择端齿盘外置结构的直角铣头。

参考文献：

[1] 王陈伟 . 数控龙门机床用五面体中心出水直角铣头 [J]. 制造技术与机床 ,2017(01):157-158.

[2] 杨林 , 黄继春 , 李攀科 , 浦娇 .FANUC 柔性同步控制在自动分度直角铣头上的运用 [J]. 制造技术与机床 ,2018(11):184-188.

[3] 张州进 , 安永飞 , 符世忠 . 直角铣头 C 轴自动分度结构设计及应用 [J]. 机械设计 ,2021,38(S1):202-204.

[4] 王宏 , 席霞 , 潘耀庭 . 一种新型的数控镗铣床主轴系统设计 [J]. 组合机床与自动化加工技术 ,2009(04):64-66.

[5] 李阳 . 基于铣头静动态特性分析的龙门铣床切削参数确定及快速选取 [D]. 苏州 : 苏州大学 ,2018.

[6] 陈叶 . 全自动直角铣头结构设计及夹持系统优化研究 [D]. 苏州 : 苏州大学 ,2018.

[7] 高立国 , 蒋疆 , 张佳朋 . 直角铣头在五轴加工中的刀尖点补偿技术 [J]. 航天制造技术 ,2015(02):31-35.

作者简介：张慧芳（1982.01-），女，汉族，天津人，硕士，工程师，研究方向：龙门式数控镗铣床。

（上接第 78 页）

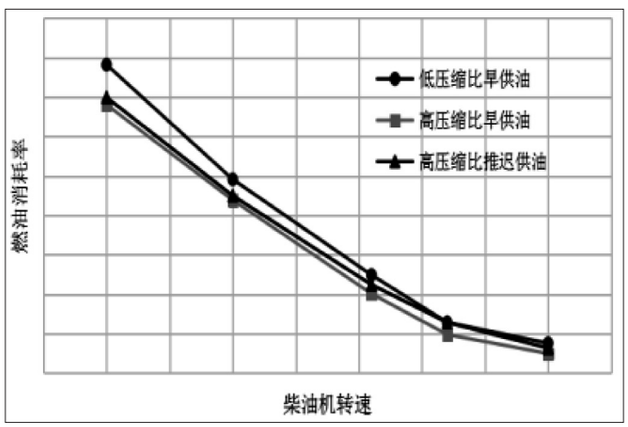

图 6 油耗对比

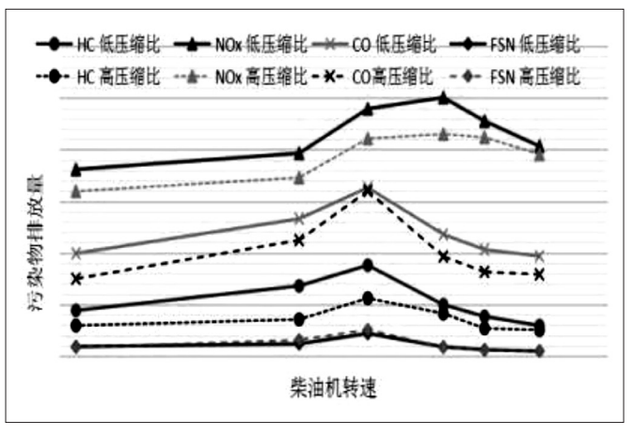

图 7 排放对比

[3] 徐凯 , 朱梅林 , 李兵 . 发动机排气污染物控制技术及发展趋势 [J]. 车用发动机 ,1998(6):7-12.

[4] 吕林 , 吴锦翔 , 高孝洪 . 排放法规给柴油机发展带来的挑战 [J]. 武汉交通科技大学学报 ,1999,23(3):234-238.

[5] 罗马吉 , 熊锋 , 颜伏伍 , 施祥 , 张超建 . 降低非道路用增压柴油机 NOx 和 PM 排放的试验研究 [J]. 内燃机工程 .2009(5):28-30+35.

[6] 褚建超 . 高压缩比柴油机晚喷燃烧特性研究 [D/OL]. 武汉 : 武汉理工大学 ,2015[2015-5-1].https://www.doc88.com/p-3945286866442.html?r=1.

作者简介：朱守全（1992.04-），男，汉族，吉林蛟河人，工程师，硕士，研究方向：柴油机性能计算与试验。

67-96 综合 9月中 第26期 .indd 82 2022/3/10 16:28:03