

同步器接合姿态研究

□ 唐山爱信齿轮有限责任公司 / 徐海山 周娇 王克

同步器换挡系统。同步器系统是实现变速器无冲击换挡的重要部件之一。行业里对同步器的结构、换挡工作原理已经有了较为深入的研究。其中，结构设计方面：双锥面、三锥面和锥面贴碳的同步器已经得到了广泛的应用；杠杆同步器、偏尖角同步器、长短齿同步器也被应用到部分产品中；即便是自增力同步器、超薄型同步器、小锥角同步器也都进入了同步器设计人员的研究视野，个别产品已经进入了试验测试阶段。换挡性能方面：换挡行程、换挡力、换挡时间、换挡冲量等参数作为换挡性能的量化控制参数已被普遍应用；吸入感、清晰度、两段感、换挡噪声等指标作为换挡性能的主观评价指标，也已为很多变速器公司所熟知。虽然近几年关于同步器的新技术层出不穷，但是对同步器接合姿态进行细节分析和研究的资料还鲜见于各种文献和研究资料。为全方位提升变速器的换挡性能及同步器耐久性，本文从同步器的接合姿态方向进行了详细的分析研究。

同步器接合姿态研究术语说明

同步器接合姿态是指在换挡同步瞬间，齿套与同步环倒尖角部位的相对位置状态。

倒尖角 (α)：齿套和同步环齿的两倒棱面所组成的夹角，齿套为 α_1 ，同步环为 α_2 。

棱线角 (β)：倒尖角棱线与端面所组成的角度，齿套为 β_1 ，同步环为 β_2 。

齿厚 (b)：花键分度圆的弧齿厚，齿套为 b_1 ，同步环为 b_2 。

X 值：齿套倒尖角中心到同步环倒尖角中心的距离。

花键齿宽方向平面姿态研究

同步器在齿宽方向的接合姿态主要与齿套倒尖角 (α_1)、同步环倒尖角 (α_2) 以及 X 值相关。随着这三个参数的变化，同步器的接合姿态也会相应发生变化。倒尖角 α_1 、 α_2 的设计值取决于同步器的锁止比，即确保同步过程中锥面摩擦力矩始终大于倒尖角处的拨环

力矩。 X 值的设计值受多种因素影响，首先要确保同步前齿套与同步环的齿错开半个齿以实现倒棱面锁止。其次要确保倒棱面接触部位的面压以避免早期磨损失效。第三要考虑同步瞬间对同步环的保护以及换挡手感良好。

下面对各种典型接合姿态进行分析研究（见图1）。

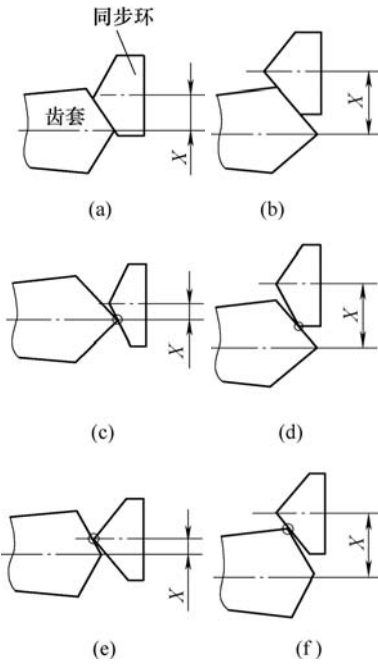


图1 齿宽方向姿态

(1) 当 $\alpha_1=\alpha_2$, X 值 $<(1/2)b_1$ 时, 接合姿态如图1a所示。同步过程中齿套与同步环的倒棱面接触, 这是理想的接触姿态。工程设计中 α_1 、 α_2 都有角度公差, 实际零件接触时很难稳定维持这种理想姿态, 随着 α_1 、 α_2 的角度在公差内变化, 接触姿态随之变化, 这也是日系产品多数都不采用此接触姿态的原因。因 α_1 、 α_2 的角度公差通常为 $\pm 1^\circ$, 可按 $\alpha_1=\alpha_2$ 进行设计计算和校核。此姿态下, 齿套与同步环的倒棱面接触面积大、面压小、同步器耐久寿命长, 部分德系和国内品牌产品采用此设计姿态。另外, 由于 X 值小, 同步完成后, 齿套越过同步环需要的滑动距离长, 增大了一次啮入和二次啮入的间隔, 手感上二次啮入冲击会比较明显, 故采用此姿态还需根据二次啮入冲击效果优化 X 值。

(2) 当 $\alpha_1=\alpha_2$, X 值 $>(1/2)b_1$ 时, 接合姿态如图1b所示。同步过程中齿套与同步环的倒棱面接触。接触姿态与图1a姿态相比, 由于 X 值大, 同步完成后, 齿套越过同步环需要的滑动距离短, 减小了一次啮入和二次啮入的间隔, 手感上二次啮入冲击感有改善, 德系产品多采用此设计姿态。它的缺点是倒角面接触面积小, 倒角面的面压大(通常设计值要求不高于280MPa), 容易磨损。设计时需要严格控制倒角面接触面积(通常设计值要求不小于 0.2mm^2)。

(3) 当 $\alpha_1<\alpha_2$ (通常偏差 2° 以内), X 值 $<(1/2)b_1$ 时, 接合姿态如图1c所示。同步过程中齿套

倒棱面, 硬度差异使齿套倒尖角容易破坏同步环倒棱面, 产生凹坑, 影响换挡手感和同步环的耐久性。由于 X 值小, 同步完成后齿套越过同步环的滑动距离长, 二次冲击感明显, 通常设计中应避免采用这种接合姿态。

(4) 当 $\alpha_1<\alpha_2$ (通常偏差 2° 以内), X 值 $>(1/2)b_1$ 时, 接合姿态如图1d所示。同步过程中同步环的侧交线冲击齿套的倒棱面, 为软材料冲击硬材料, 不会造成工作面的早期破坏。由于 X 值大, 同步完成后齿套越过同步环的滑动距离短, 二次冲击感被弱化。缺点是对同步环倒棱面的强度和耐磨性要求较高, 耐久性通常偏低。设计上, 需要通过优化倒尖角角度和 X 值, 以保证锁止比和倒棱面面压。

(5) 当 $\alpha_1>\alpha_2$ (通常偏差 2° 以内), X 值 $<(1/2)b_1$ 时, 接合姿态如图1e所示。同步过程中同步环的倒尖角棱线冲击齿套的倒棱面, 由于前述材料及硬度原因, 不会造成工作面的早期破坏。由于 X 值小, 同步完成后齿套越过同步环的滑动距离长, 二次冲击感较明显, 必要时优化 X 值来减小二次冲击感。此接触姿态由于耐久寿命好且 α_1 、 α_2 在公差范围内变化时不会改变姿态, 因而在日系产品中得到广泛应用。

(6) 当 $\alpha_1>\alpha_2$ (通常偏差 2° 以内), X 值 $>(1/2)b_1$ 时, 接合姿态如图1f所示。同步过程中齿套的侧交线冲击同步环的倒棱面, 由于前述材料及硬度原因, 容易在同步环的倒棱面上冲击出凹坑, 滑动时刮走材料, 耐久寿命降低。这种设计姿态通常需要大的锁止比或提

高同步环硬度, 避免同步过程中滑动损伤同步环寿命。由于 X 值大, 同步完成后齿套越过同步环的滑动距离短, 二次冲击感被弱化。同样由于 X 值大, 齿套和同步环倒棱面接触面积偏小。设计上需要优化倒尖角角度、 X 值, 提升同步环硬度来确保同步环的耐冲击性能。由于换挡性能好, 个别日系产品中应用了这种接触姿态。

花键齿高方向平面姿态研究

花键齿高方向的接合姿态主要受齿套棱线角(β_1)和同步环棱线角(β_2)的影响(见图2)。棱线角的设计值主要考虑保证同步器的耐久性和换挡手感, 有时也受到刀具直径的影响(通常设计范围在 6° 以内)。

(1) 当 $\beta_1<\beta_2$ (通常偏差 $2^\circ\sim 4^\circ$)时, 接合姿态如图2a所示, 齿套的棱线顶部冲击同步环的倒棱面根部。因前述材料和硬度原因, 容易造成同步环齿根部位的早期磨损或划痕影响同步器耐久性。同时, 划痕一旦产生, 对换挡手感也产生不利影响。设计时应避免采用此接合姿态。

(2) 当 $\beta_1>\beta_2$ (通常偏差 $2^\circ\sim 4^\circ$)时, 接合姿态如图2b所

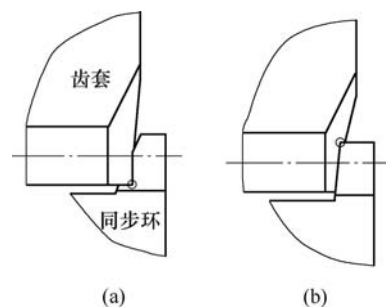


图2 齿高方向姿态

示,同步环的棱线顶部冲击齿套的倒棱面根部,由前述材料和硬度分析,不会对倒棱面造成损伤,对同步环耐久性和换挡手感都是有利的。德系、日系及国内多数产品设计采用此接合姿态。

齿宽、齿高方向综合空间姿态及分析

同步器平面接合姿态从齿宽、齿高方向分别进行分析研究,齿宽方向反映的是分度圆上的接触姿态。而空间姿态是从齿宽、齿高两个方向综合进行分析。由于齿高方向棱线角的存在,空间上分析,齿套与同步环的接触位置并不都在分度圆上。空间姿态受到倒尖角 α_1 、 α_2 、棱线角 β_1 、 β_2 和X值五个参数的综合影响。

(1) 当 $\alpha_1=\alpha_2$, X值 $<(1/2)b$, $\beta_1>\beta_2$ 时,接合姿态如图3a;当 $\alpha_1=\alpha_2$, X值 $<(1/2)b$, $\beta_1<\beta_2$ 时,接合姿态如图3b。

这两种空间姿态是在图1a姿态的基础上,由于棱线角的不同,演变成了两种姿态。图3a的空间姿态下,同步环的顶交线接触在齿套倒棱面的靠近齿根部,而非分度圆上。由前述材料和硬度的分析,此姿态不易产生接触部位的异常磨损

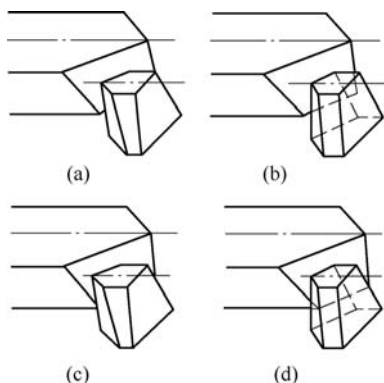


图3 齿套与同步环等倒尖角角度时空间姿态

和早期失效。尤其在 β_1 、 β_2 角度差比较小的情况下,接触面积大,面压小,同步器耐久性好。此状态下,虽然因X值小导致二次啮入冲击感明显,但通过倒尖角 α_1 、 α_2 和棱线长度的优化,仍能达到比较好的换挡手感,成为比较好的同步器接合姿态之一。图3b姿态下,齿套的顶交线接触在同步环的倒棱面靠近齿根部位。考虑材料和硬度原因,同步环倒棱面靠近齿根部位容易产生异常磨损和划痕。磨损和划痕的存在,影响同步器耐久性和滑动顺畅性,通常不建议采用此设计姿态。

(2) 当 $\alpha_1=\alpha_2$, $\beta_1>\beta_2$, X值 $>(1/2)b$ 时,接合姿态如图3c;当 $\alpha_1=\alpha_2$, $\beta_1<\beta_2$, X值 $>(1/2)b$ 时,接合姿态如图3d。

这两种空间姿态是在图1b姿态的基础上,由于棱线角的差别演变成的两种姿态。平面姿态接触位置在分度圆上,由于X值 $>(1/2)b$ 同步环倒尖角角偏移到了齿套的倒棱面之外。图3c空间姿态下,同步环的顶交线接触在齿套倒棱面的靠近齿根部,因齿根部齿厚大于分度圆齿厚,虽然X值 $>(1/2)b$,但实际接触部位,同步环尖角并未偏移出齿套的倒棱面根部。设计上应用此接触姿态时,可通过X值的调整来优化接触部位面压,提升耐久性。结合前面的分析,这种接合姿态同步器的耐久性适中,二次啮入冲击弱化,换挡手感好,是比较理想的接触姿态之一。图3d空间姿态下,齿套的顶交线接触在同步环的倒棱面靠近齿根部,考虑材料和硬度原因,同步环倒棱面靠近齿根部位容易产生异常磨损和划痕,

影响耐久性。由于划痕的存在,换挡手感有卡涩风险。综合判断不是理想的接触姿态。

(3) 当 $\alpha_1<\alpha_2$, X值 $<(1/2)b$, $\beta_1>\beta_2$ 时,接合姿态如图4a所示;当 $\alpha_1=\alpha_2$, X值 $<(1/2)b$, $\beta_1<\beta_2$ 时,接合姿态如图4b所示。

这两种空间姿态与平面姿态图在1c的基础上,由于棱线角的差别演变成两种姿态。图4a姿态下,同步环的顶交线接触在齿套倒尖角棱线靠近齿根部,考虑材料和硬度的差别,容易造成同步环顶交线部位产生冲击凹坑和异常磨损,影响耐久性。冲击凹坑的存在,容易发生换挡卡滞。结合前面的分析,由于X值偏小,二次啮入冲击感明显。综合分析,此接触姿态并不适合设计时采用。图4b姿态下,齿套的倒尖角棱线顶点接触在同步环的倒棱面靠近齿根部位,考虑材料和硬度差异,同步环倒棱面靠近齿根部位容易产生异常磨损和划痕。结合前面的分析,由于X值偏小,二次啮入冲击感明显。综合分析,此接触姿态下,同步环耐久性差,异常磨损和划痕导致换挡手感有卡涩风险,设计时,不建议采用此接触姿态。

(4) 当 $\alpha_1<\alpha_2$, $\beta_1>\beta_2$, X

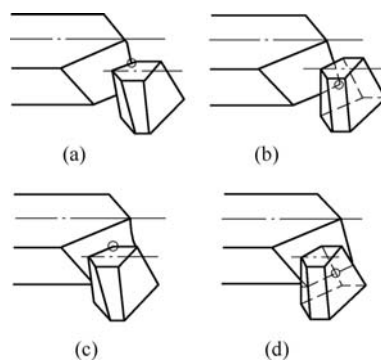


图4 齿套小于同步环倒尖角角度时空间姿态

值 $> (1/2)b$ 时, 接合姿态如图4c所示; 当 $\alpha_1 < \alpha_2, \beta_1 < \beta_2, X$ 值 $> (1/2)b$ 时, 接合姿态如图4d所示。

这两种空间姿态是在平面姿态图1d的基础上, 由棱线角的差别演变成的两种姿态。图4c姿态下, 同步环的侧交线顶点接触在齿套倒棱面的靠近齿根部, 分析材料和硬度影响, 不容易造成接触部位异常磨损。结合前面的分析, 由于X值偏大, 二次啮入冲击感弱化。此状态下, 齿套和同步环棱线角差异不宜过大, X值也不宜过大, 以面压计算满足要求为准。综合分析, 耐久性适中, 换挡手感好是理想接触姿态之一。图4d姿态下, 齿套的顶交线接触在同步环的侧交线靠近齿根部位, 考虑材料和硬度原因, 同步环侧交线靠近齿根部位容易产生异常磨损和划痕。综合分析, 同步环耐久性一般, 换挡手感好, 但划痕产生会使换挡手感有卡涩风险。在采用硬度和耐磨性更高的同步环材料之前, 设计上不建议采用此接触姿态。

(5) 当 $\alpha_1 > \alpha_2, X$ 值 $< (1/2)b, \beta_1 > \beta_2$ 时, 接合姿态如图5a所示; 当 $\alpha_1 > \alpha_2, X$ 值 $< (1/2)b, \beta_1 < \beta_2$ 时, 接合姿态如图5b所示。

这两种空间姿态是在平面姿态图1e的基础上, 由棱线角的差别演变成两种姿态。图5a姿态下, 同步环的顶交线顶点接触在齿套倒棱面靠近齿根部, 结合前面的分析, 此姿态不会产生接触部位的异常磨损和早期失效, 耐久性好。由于X值偏小, 二次啮入冲击感明显。通过

α_1, α_2 角度和棱线长度的优化改善二次啮入冲击感后, 此接合姿态仍不失为理想的接触姿态之一。图5b姿态下, 齿套的顶交线接触在同步环的倒棱面靠近齿根部位, 考虑材料和硬度原因, 同步环尖角棱线的根部容易产生异常磨损和划痕。综合分析此姿态同步环耐久性一般, 二次啮入冲击感明显, 设计上不建议采用此接触姿态。

当 $\alpha_1 < \alpha_2, \beta_1 > \beta_2, X$ 值 $> (1/2)b$ 时, 接合姿态如图5c所示; 当 $\alpha_1 < \alpha_2, \beta_1 < \beta_2, X$ 值 $> (1/2)b$ 时, 接合姿态如图5d所示。

这两种空间姿态是在平面姿态图1f的基础上, 由于棱线角的差别演变成的两种姿态。平面姿态反映的是在分度圆上齿套与同步环的接触姿态。由于X值 $> (1/2)b$ 尖角部位偏移到了倒棱面之外。图5c的空间姿态下, 同步环的倒尖角棱线顶点接触在齿套倒棱面的靠近齿根部, 虽然X值 $> (1/2)b$, 同步环尖角部位并未偏移出齿套的倒棱面根部。结合前面的分析, 此姿态不会产生接触部位的异常磨损和早

期失效, 耐久性好。且由于X值偏大, 二次啮入冲击感弱化, 换挡手感好。在保证接合部位面压的前提下, 此姿态是理想的同步器接合姿态之一。图5d空间姿态下, 齿套的侧交线顶点接触在同步环的倒棱面靠近齿根部位, 考虑材料和硬度原因, 同步环倒棱面靠近齿根部位容易产生异常磨损和划痕。划痕的产生导致换挡手感有卡涩风险, 设计时, 不建议采用此接触姿态。

结语

综上所述, 同步器的接合姿态受到倒尖角 α_1, α_2 、棱线角 β_1, β_2 和X值五个参数的综合影响。虽然平面接合姿态和空间接合姿态都能对同步器的性能和耐久性进行评估, 但空间接合姿态能够更真实直观的反映同步器的接合状态, 同时演变出了更多的姿态组合。通过对同步器的空间接合姿态研究发现, 对齿套和同步环倒尖角、X值和棱线角的匹配设计, 可以提出对同步器换挡性能和同步器自身的耐久性的进一步优化方案。

本文通过对同步器空间接合姿态的研究, 找到了几种比较理想的同步器接合姿态可供同步器设计人员参考。其中, 图3a、图3c、图4c、图5a、图5c姿态是通过同步器空间接合姿态分析, 认为比较理想的接合姿态。不过由于篇幅限制, 本文只对几种典型姿态进行了分析, 具体进行设计时还需要考虑各种参数的变化范围内的其他非典型状态进行分析研究, 最终获取最优的设计方案。AUTO1950

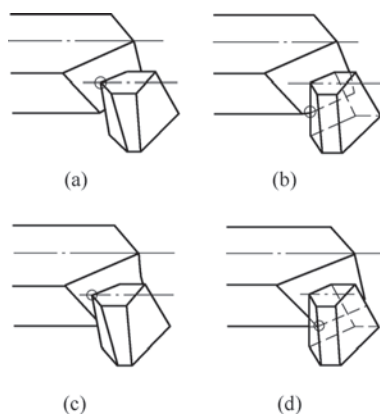


图5 齿套大于同步环倒尖角角度时空间姿态