

发动机设计过程中的公差选用

郭进举, 纪有君, 李晓静, 武喜刚, 于学全, 林凯歌, 马玉军, 谷丽娟

(中国石油集团济柴动力有限公司动力装备研究院, 山东 济南 250306)

摘要: 阐述了发动机设计过程中公差选用原则, 指出公差选用是否合理不仅影响整机性能和市场适应性, 且对加工成本影响极大。以机体设计公差选用为例, 对发动机设计过程中的公差选用与工艺系统各部分的关联性进行分析。建议: 在保证整机性能的前提下, 尽量选择较大的公差带; 粗糙度尽量不选用 Ra1.6 以下; 不片面追求形位公差的高精度, 以达到降低制造成本的目的。

关键词: 发动机; 公差; 选用; 成本

中图分类号: TK426 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2019)06-0048-04

Proper Tolerance Setting in Engine Design

Guo Jinju, Ji Youjun, Li Xiaojing, Wu Xigang, Yu Xuequan, Lin Kaige, Ma Yujun, Gu Lijuan

(CNPC Jichai Power Co., Ltd., Shandong Jinan 250306)

Abstract: The tolerance setting rule in the design of engines is expounded, and the rationality of tolerance setting not only has an influence on the performance of the whole engine and market application, but may also has a big influence on the cost of manufacturing. Taking the engine block tolerance as an example, the relation between tolerance setting and processing system is analyzed. With the premise of ensuring the whole engine's performance, choosing the biggest allowable tolerance, keeping the roughness not less than Ra1.6 and not excessively pursuing high-precise form and location tolerance are suggested, which can reduce the cost of manufacturing.

Key words: engine; tolerance; setting; cost

0 引言

在发动机设计过程中对于公差的选用一般遵循互换性、工艺性和成本控制等原则^[1]。其选用是否得当不仅影响整机设计性能和市场适应性, 而且对加工成本、质量特性影响极大。如何在保证整机性能的前提下降低制造成本是发动机制造厂商的重要课题。而选用适当的公差要求是降低发动机制造成本的有效手段。

本文以某型气体发动机在设计过程中对典型的箱体类零部件——机体(关键件的关键部位)的公差选用为例, 对发动机设计过程中公差选用与工艺系统各部的关联性进行阐述, 力求在保证整机性

能的前提下, 降低对工艺系统(特别是加工设备)的要求, 从而达到降低制造成本的目的。

1 发动机公差选用依据及原则

公差主要包括选用公差和通用公差(标注公差)两类, 本文主要讨论选用公差^[2]。对发动机而言, 其零部件可分为关键件及外围部件。

外围部件的公差选用多为未注公差, 一般按 m 级选用。

发动机的关键件及主重要件包括: 箱体类的机体和缸盖, 复杂轴类的曲轴、凸轮轴及连杆 5 种零部件。其关键部位的公差选用不仅决定整机性能, 而且对工艺系统的影响和制造成本具有较大影响。

收稿日期: 2018-11-30; 修回日期: 2019-03-04

作者简介: 郭进举(1966-), 男, 教授级高级工程师, 主要研究方向为制造工艺、新产品制造及设备管理, guojinju@cnpc.com.cn。

而作为主要结构件和基础件的箱体类零部件是整个发动机中涉及公差要求最多、精度要求最高的关键件，因此，讨论发动机的公差选用，以箱体类零部件的机体公差选用为例较为适宜。

1.1 发动机设计公差选用关键点及作用

在发动机设计过程中公差选用主要涉及的关键项点包括：对组成运动副各组件之间配合公差的要求，及密封结构的公差选用及要求。

1.1.1 运动副作用及相关要求

发动机工作过程中各组件相互精准、协调配合，通过滚动、滑动等运动副将活塞的往复运动转化为曲轴的旋转运动，完成燃料的燃烧爆发，将具有的化学能转化为对外输出的机械能，从而实现其基本功能。

对其设计的关键要求是确保运动的精准完成，并将摩擦磨损对零部件的损伤控制在最低^[1]。

发动机性能与整机装配完成后运动副间的各种误差（包括加工误差、装配误差、检验误差等）的累积是否满足最终公差要求有关，即设计过程中对运动副公差选用造成的综合误差是否满足发动机性能要求相关。

1.1.2 密封结构作用及相关要求

发动机中的工作介质包括空气和燃料（燃油或可燃气体）；冷却润滑介质包括冷却水和润滑油，因此发动机设计有气道、水道、润滑油道、燃油或燃气管道。由缸盖、缸套、活塞及活塞环构成的燃烧系统是整个发动机设计中的关键。对各种密封结构零部件的孔径、轴颈及平面的公差选择（包括尺寸和形位公差）尤为重要。

1.2 发动机关键部位及涉及公差汇总

发动机设计过程中涉及到运动副和密封结构的零部件部位为关键部位，其承担的作用不同，对其选用的公差要求也不同。

运动副的公差配合包括：尺寸公差——孔轴之间配合类型；形位公差——孔系之间的相对位置（包括孔孔间距、孔面间距及面面间距等）、孔轴的形状公差及粗糙度等。

密封结构包含平面、线接触及过盈配合等，其中，平面密封的公差包括面的平面度、粗糙度；线接触密封的公差包括角度公差、形状公差及粗糙度等。

以机体为例，其所涉及到运动副和密封结构的关键部位及公差类型如表 1 所示。

表 1 机体关键部位公差要求分类汇总

分类	关键部位	公差及要求			配合部位	配合类型
		公差类别	公差名称	等级要求		
运动副	主轴孔	尺寸		H7	轴瓦（D8）、 曲轴颈（h6）	间隙
		形位	 Ra	0.8		贴合度
				0.02		
				Φ0.20		
				全长 0.05 相邻 0.03		
	缸孔	尺寸	上缸带	H7	缸套、活塞	间隙
			下缸带	H7		
		形位	 Ra	3.2		贴合度
				0.04		
				Φ0.40		
	瓦盖定位	尺寸	宽度	H7	瓦盖	过渡
		形位		0.025		贴合度
密封结构	缸孔平面	形位		1.6	缸垫、缸套	贴合度
				0.05		
	缸带	尺寸	上缸带	H7	缸套、胶圈	过渡
		尺寸	下缸带	H7		
		形位	粗糙度 Ra	3.2		

2 发动机关键部件公差分类及需求

根据运动副与密封结构作用不同,其公差项目和要求也各不相同。本文分别以主轴孔及缸孔平面为例对运动副及密封结构的公差需求及作用进行分析。

2.1 运动副公差分类与要求

2.1.1 尺寸公差配合与要求

运动副之间的公差配合为间隙配合,配合间隙的大小取决于运动副所承受的压力及摩擦系数要求。如表 1 中主轴孔、轴瓦及曲轴之间的配合:主轴孔安装轴瓦后,要求组装后内孔尺寸公差 D8,与曲轴的主轴颈尺寸公差(h6),形成运动副(D8/h6)的大间隙配合,利于承压油膜形成。

2.1.2 形位公差配合与要求

表 1 中,形位公差中的粗糙度 Ra0.8 和圆柱度 0.02 决定了主轴孔与轴瓦之间的贴合度,影响到轴瓦的承重与散热;位置度和主轴孔圆跳动,决定曲轴是否能在正确位置实现准确运动,即曲轴的旋转轴线是否在正确位置实现相关运动。

2.2 密封结构公差分类与要求

表 1 中,平面密封结构缸孔平面的粗糙度 Ra 和平面度均为形位公差;轴向密封结构缸带涉及到尺寸公差。具体要求见表 1。

3 公差与加工系统组成的对应关系

通常公差分为尺寸公差和形位公差,而加工工艺系统由机床、刀具、加工方式及工艺装备等部分

组成。工艺系统中的各部分对保证公差所起的作用各不相同。在进行工艺设计中须根据公差种类选择不同的工艺系统组成,以保证加工质量和效率^[3]。

3.1 公差与工艺系统各部分的对应关系

不同的公差种类对应着工艺系统中不同的组成部分,其之间的关系如表 2 所示。

表 2 公差与工艺系统的对应关系

公差种类	公差分类	工艺系统组成
尺寸		刀具
形位公差	粗糙度	加工方式
	形状	机床
	位置	工艺装备

须特别说明的是,间距尺寸(孔间距、面间距等)虽用尺寸表达,但本文视为位置公差,因为其表达或限制的为表征一相对距离,实际为位置。

3.2 形位公差对机床和工艺装备的影响与要求

形位公差的保证不仅与机床和工艺装备本身的精度(包括制造误差、调整误差、加紧误差、测量误差等)有关,而且与工艺系统在加工过程中的受力变形、热变形,以及工件的残余应力导致的变形等有关^[4]。为确保要求的形位公差和足够的工艺储备,工艺设计人员在选择机床和工艺装备时,一般要求机床与工艺装备的精度为工件要求精度的 1/3 或 1/5^[5]。如加工主轴孔选择加工中心,其形位公差和机床相应精度对应如表 3。

表 3 形位公差与机床工艺装备精度的对应

公差及要求			机床及工装	
公差类别	公差名称	等级要求	项目	要求
形位		0.02	主轴回转精度	0.005
		Φ0.20	工作台重复定位精度	0.04 ~ 0.06
		全长 0.05	主轴重复定位精度	0.01
		相邻 0.03		

3.3 粗糙度对加工方式的影响与要求

粗糙度要求是所有加工部位均须标注的特殊形位公差,是由加工方式所决定的,不同的粗糙度要求对应不同的最佳加工方式。

各种加工方式的加工效率和经济性各不相同。根据粗糙度要求,在确定加工设备的基础上,选择加工方式。如主轴孔的粗糙度 Ra0.8,采用加工中心,加工方式只能是精铰。相关资料显示,粗糙度每提高一级,加工成本提高一倍左右。

3.4 尺寸公差对刀具的影响与要求

标注尺寸公差的孔或轴,一般须精加工才能形

成。目前精加工刀具多采用可转位刀片的精镗单元,其调整精度 0.002 ~ 0.005,可以满足绝大多数的尺寸公差要求。

刀具在加工过程中会产生磨损,其耐用度 T 与尺寸公差大小相关。较小的公差带必然降低刀具的耐用度,增加加工成本。

4 设计过程中对公差的选择

在确保发动机整体性能的前提下,依据公差与加工系统各部之间的对应关系,选择适合的公差,对工件的互换性、工艺性和成本控制具有较好的

作用。

4.1 尺寸公差的选用原则及注意事项

工件的尺寸公差由公差代号和公差带两者组成。公差代号确定刀具调整的初始状态, 而公差带大小决定刀具的磨损程度, 即和刀具的耐用度 T 相关。

目前关键部位的尺寸公差带多选择 6 ~ 7 级, 如主轴孔选择 H6, 缸孔选择 H7。

以主轴孔为例, 公差 H6 (0, +0.029) 和 H7 (0, +0.046), 公差带放大了 1.5 倍。如果刀具选择不当, 在初期磨损阶段就可能导致磨损量超出公差带 H6 要求, 造成刀具的极大浪费。公差带放大, 刀具在正常磨损阶段使用时间会大大延长, 远超出公差带 H6 使用时间的 1.5 倍。

因此在性能允许的情况下, 尽可能选择 H7 作为尺寸公差的常用 (或最高) 选项。如此, 刀具使用时间会成倍增长, 加工成本大大降低。对于公差带变化造成的间隙配合变化, 可以通过调整尺寸链中的其它易加工、非刀具形成尺寸等部位的公差来进行修正。

4.2 尽量选择较低的粗糙度要求

粗糙度由加工方式实现。各种加工方式不仅对机床有具体要求, 而且其本身的加工精度 (形位公差) 和经济性也各不相同。

如主轴孔的粗糙度为 Ra0.8, 在龙门加工中心加工, 只能采用精铰的加工方式。

精铰加工方式为典型的挤削加工, 不仅要求机床的功率较大, 而且其准备工序包括粗、半精、精加工三道工序, 加工时间较长, 经济性较差; 且其加工属于随行加工, 对其余的形位公差 (圆柱度和跳动) 的保证起到相反的作用。

如果主轴孔的粗糙度改为 Ra1.6, 不仅加工方式的选择更为自由 (可以采用常用的精车或精镗的加工方式); 且可以采用较大的切削用量, 提高加工效率。

因此, 在保证性能的前提下, 尽量降低粗糙度要求, 是提高加工效率, 降低生产成本的有效手段。在设计过程中不建议选用 Ra1.6 以下的粗

糙度。

4.3 形位公差对机床和工艺装备的影响与选择

较高的形位公差要求必然带来对工艺系统中机床和工艺装备 (包括夹具、夹紧装置、连接装置、测量装置等) 的更高要求。前文阐述形位公差与机床和工艺装备精度之间的 1/3 或 1/5 关系, 是选择机床和工艺装备的前提条件。

过于追求形位公差的高精度, 不仅会造成加工成本急剧增加 (精密设备的价格、维修保养费用、使用寿命等成本与普通设备之间是无法相提并论的)^[6-7]; 而且会出现没有设备可以承担加工内容的情况, 勉强选择设备承担加工任务, 整个加工过程能力指数 K_p 极低, 出现超差现象的频率会加大。

5 结论

在发动机设计过程中, 不仅须考虑公差对整机性能的影响, 而且须考虑公差对工艺系统的影响。过高的公差要求不仅会导致加工效率下降, 加工成本急剧增加; 而且造成加工过程能力指数不足, 废品率增加。因此建议在满足整机性能前提下: 尽量选择较大的公差带; 粗糙度选择不建议选用 Ra1.6 以下; 不片面追求形位公差的高精度。

参考文献

- [1] 山东内燃机学会质量标准专业委员会. 内燃机标准资料汇编 [R]. 2004.
- [2] 王选逵. 机械制造工艺学 (第二版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [3] 赵如福. 金属机械加工工艺人员手册 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1983.
- [4] 蔡复之. 实用数控加工技术 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995.
- [5] 梁炳文. 机械加工工艺与窍门精选 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [6] 许祥泰, 刘艳芳. 数控加工编程实用技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [7] 沙杰. 加工中心结构、调试与维护 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.