

注：天津市科技支撑计划项目（项目编号：12ZCZDZX04400）

摘要：介绍了氧化锆式氧传感器在汽车排放控制系统中的重要性，按照检测空燃比数值范围的宽窄对国内外现阶段主要的氧化锆式氧传感器进行了分类，对传统的“杯型”氧传感器、“平面型”氧传感器和新型空燃比传感器的结构组成、工作原理、信号特性及应用情况进行了介绍，重点论述了单元件型空燃比传感器和双元件型空燃比传感器的工作机理，比较分析了这几类氧化锆式氧传感器的优缺点，归纳得出了新型空燃比传感器将逐步取代传统氧传感器，未来能够满足检测范围宽、工作温度低、体积小氧传感器将成为汽车氧传感器的发展趋势。

关键词：汽车；排放控制系统；空燃比；氧化锆式氧传感器；发展趋势

中图分类号：TP212.2 文献标识码：A 文章编号：

收稿日期：2013-12-24

汽车用氧化锆式氧传感器 应用现状与发展趋势

何泽刚 申荣卫 韩炯刚

天津职业技术师范大学汽车与交通学院，天津 300222

一、引言

随着经济和汽车工业的发展，汽车的使用量迅速增加，人们也越来越重视尾气污染。汽车排放污染物主要有 CO、HC 和 NO_x，在机外净化措施中多采用装有铂、铑、钯的三元催化器对 CO、HC 进行氧化反应和对 NO_x 进行还原反应，将其转换成无害成分。氧化反应需要氧的参与，还原反应必须在缺氧的条件下进行，所以当可燃混合气处于理论空燃比附近极小的范围内时，三元催化器对三种有害成分的转换效率最高^[1]，如图 1 所示。

为提高三元催化转化器的效率，减少排放，需对空燃比进行闭环控制，使其保持在理论空燃比附近。安装在排气管上的氧传感器可以检测排气中氧气的浓度，并将此信号反馈给发动机电控单元（ECU），ECU 据此判断可燃混合气的浓度，进而调节喷油器的喷油量，使可燃混合气的浓度保持在理论空燃比附近，达到节油、降低排放和净化尾气的目的。氧化锆式氧传感器是目前最成熟、产量最多的一种氧传感器^[2]，

是汽车排放控制系统中的关键部件之一，其信号输出特性直接影响发动机的燃油经济性和排放控制，因此，对氧化锆式氧传感器的研究和开发具有重要意义。

二、氧化锆式氧传感器应用现状

氧化锆式氧传感器是基于氧化锆固体电解质的材料特性来检测尾气中氧浓度的^{[3][4]}，按检测空燃比数值

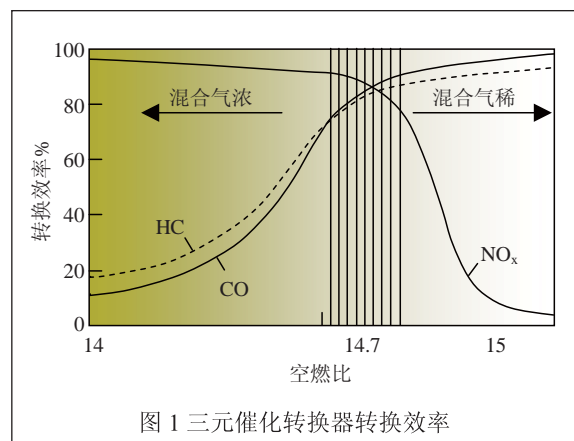


图 1 三元催化转换器转换效率

的范围不同分为：窄型氧传感器和宽型氧传感器。窄型氧传感器即“传统氧传感器”，只能检测空燃比是大于或小于 14.7；宽型氧传感器即新式氧传感器，简称“空燃比传感器”，能检测的空燃比范围为 23:1~11:1，且检测精度高，不仅能使发动机实现稀混合气或浓混合气控制，而且喷油量的控制更加精确。

按传感器是否有加热装置分为：加热型和非加热型氧传感器。加热型氧传感器内有一个起预热作用的加热元件，在发动机启动后的 20~30s 内可迅速将氧传感器加热至工作温度；而非加热型氧传感器内没有加热元件，需靠排气的热量进行加热，这种传感器需要发动机启动并运转数分钟以后才能工作。

1、传统氧传感器

(1) 结构组成

传统氧传感器按照氧化锆的形状可分为“杯型”和“平面型”。杯型氧传感器的氧化锆被做成试管状，也称“锆管”，如图 2 所示。平面型氧传感器的氧化锆被做成平面状，其横截面为矩形，如图 3 所示。

杯型氧传感器安装在排气管或排气歧管上，传感器锆管内侧通大气，外侧暴露在排气中。锆管的内外表面分别覆盖了薄层多孔铂（白金）作为电极，内表面是正极，外表面是负极^[6]。在外侧电极表面一般还有一个多孔氧化铝陶瓷保护层，陶瓷层外加有带槽口的保护罩，目的是防止铂膜被废气腐蚀并保证废气与锆管接触。传感器通过安装螺纹安装在排气管上的安装孔中，信号线由锆管内外表面引出，接线端有一个金属护套，其上开有一

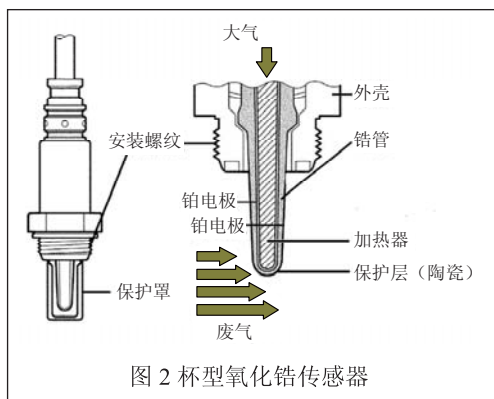


图 2 杯型氧化锆传感器

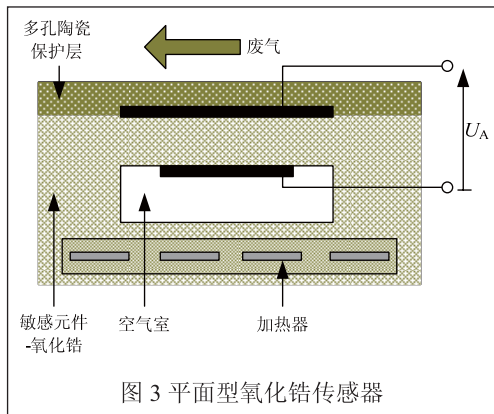


图 3 平面型氧化锆传感器

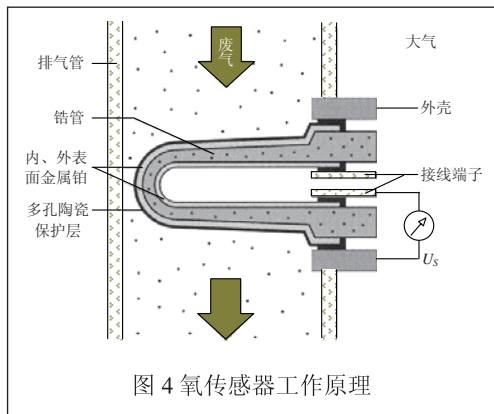


图 4 氧传感器工作原理

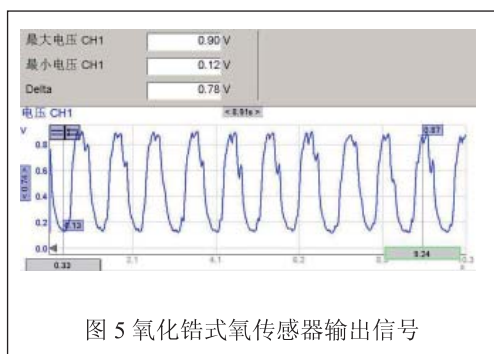


图 5 氧化锆式氧传感器输出信号

个小孔，使锆管内表面与大气相通。

(2) 工作原理

发动机排出的废气从氧传感器的端部经过并与锆管的外表面接触，空气从传感器尾部的通气孔进入锆管的内表面，如图 4 所示。在温度超过 300℃ 时氧发生电离，根据 ZrO_2 的测氧原理，由于大气中的氧气比废气中的氧气多，因而氧离子从大气侧向废气侧扩散，两侧离子的浓度差产生电动势，此时锆管相当于一个微电池，向外输出电压信号。锆管内外表面氧浓度差越大，输出电压信号也越高。

(3) 信号特性

当可燃混合气浓时，废气中氧含量少，在铂的催化作用下，低浓度的氧和排出的 CO 及 HC 发生反应^[5]，使锆管外表面的氧气几乎消失，传感器内外表面的氧浓度差较大，产生的电压接近 1V（一般为 0.8~0.9V）；当可燃混合气稀时，废气中含有大量的氧，传感器内外表面的氧浓度差小，两铂极间电压骤减，输出电压接近 0V（一般为 0.1~0.2V）^[6]。传统氧传感器的实测输出信号如图 5 所示，氧传感器产生的电压在理论空燃比 14.7:1 时发生突变，因此该传感器也被称为“两状态氧传感器”。

平面型氧化锆传感器的工作原理与杯型氧化锆传感器工作原理相同。

2、空燃比传感器

空燃比传感器按照内部固体电解质的多少分为两种基本类型：单元件型和双元件型^[7]。单元件型空燃比传感器内部有一个氧化锆固体电解质，也称“极限电流型空燃比传感器”。双元件型空燃比传感器内部有两个氧化锆固体电解质，一个作为氧浓差电池，一个作为氧气泵^[10]。

(1) 单元件型空燃比传感器结构及工作原理

以丰田汽车上使用的单元件型空燃比传感器为例，其结构如图 6 所示。它内部有一个氧化锆固体电解质，电解质两侧有金属铂电极。除此之外还包括加热元件、氧化铝导热层、空气腔、扩散腔、扩散阻力层。废气可由扩散阻力层扩散到扩散腔，作用在氧化锆固体电解质的上表面（阴极）。扩散阻力层由 600μm 厚的尖晶石制成的多孔层，用来控制废气扩散的速度。空气腔内的空气与氧化锆固体电解质的下表面（阳极）接触。

单元件型空燃比传感器的电路控制原理如图 7 所示。ECU 内部有两个稳压电路，分别向 ECU 的端子“AF-”和“AF+”提供固定的电压 2.9V 和 3.3V，空燃比传感器通过线路连接在端子“AF-”和“AF+”之间。空燃比传感器中的氧化锆固体电解质检测原理类似于传统氧传感器，当其两电极侧氧浓度差发生变化时会输出一个变化的电动势。空燃比传感器可等效为一个电阻和一个电动势^[8]，电动势的大小随混合气浓度变化而变化。

当混合气较稀时，尾气中氧气较多，扩散腔与空气腔两侧的氧浓度差较小，传感器中的等效电动势小于 0.4V，在外电路的作用下，扩散腔侧氧离子受到电场的泵吸，从扩散腔侧铂电极流到空气腔侧铂电极。氧离子到达空气腔侧铂电极易失去电子，形成电流，电流流动方向如图 6 所示。在特殊的扩散阻力层作用下，通过扩散阻力层的氧气形成的限制电流正比于尾气中的氧气浓度^[9]。因此，混合气越稀，扩散腔侧铂电极氧浓度就越大，穿过氧化锆固体电解质的氧离子就越多，形成的电流就越大。

当混合气较浓时，尾气中的氧气很少，扩散腔与空气腔两侧的氧浓度差很大，传感器中的等效电动势大于 0.4V，在外电路的作用下，空气腔侧氧负离子受到电场的泵吸，从空气腔侧铂电极流到扩散腔侧铂电极。氧离子到达扩散腔侧铂电极后，它与通过扩散阻力层而没有完全燃烧的 HC 及 CO 发生化学反应，从而失去电子形成电流，电流流动方向如图 8 所示。在特殊的扩散阻力层的作用下，通过扩散阻力层的 HC 及 CO 的数量正比于尾气中未燃烧的 HC 及 CO 的浓度^[9]。因此，混合气越浓，在尾气侧电极与氧负离子发生化学反应的 HC 及 CO 越多，产生的电流也越大。

当混合气浓度在理论空燃比时，混合气几乎完全燃烧，

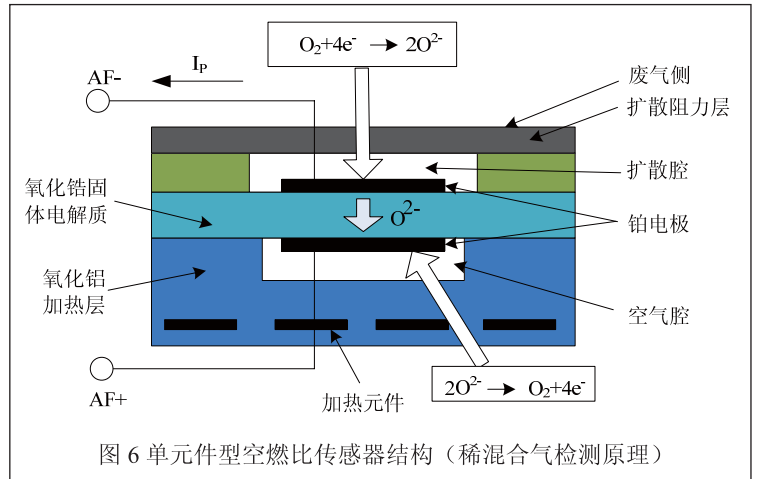


图 6 单元件型空燃比传感器结构（稀混合气检测原理）

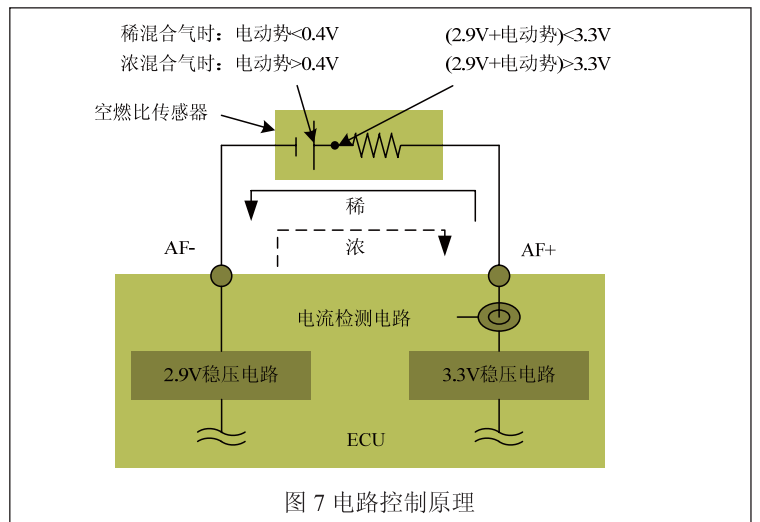


图 7 电路控制原理

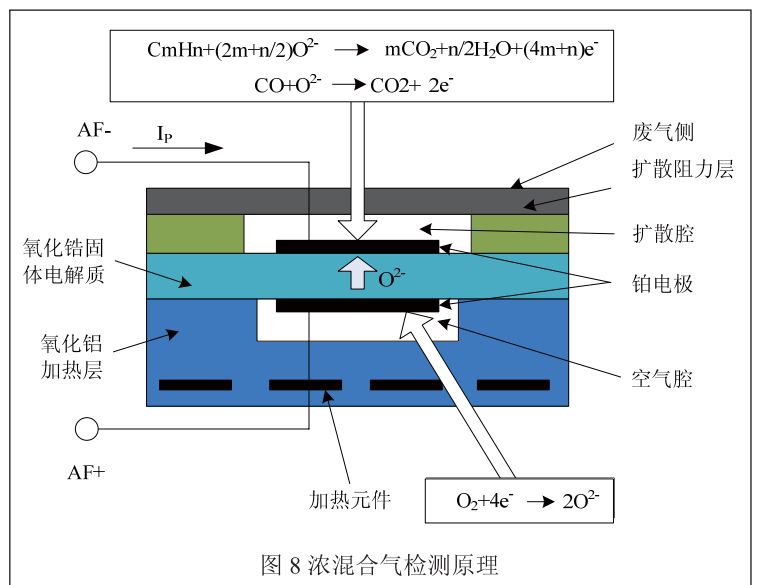
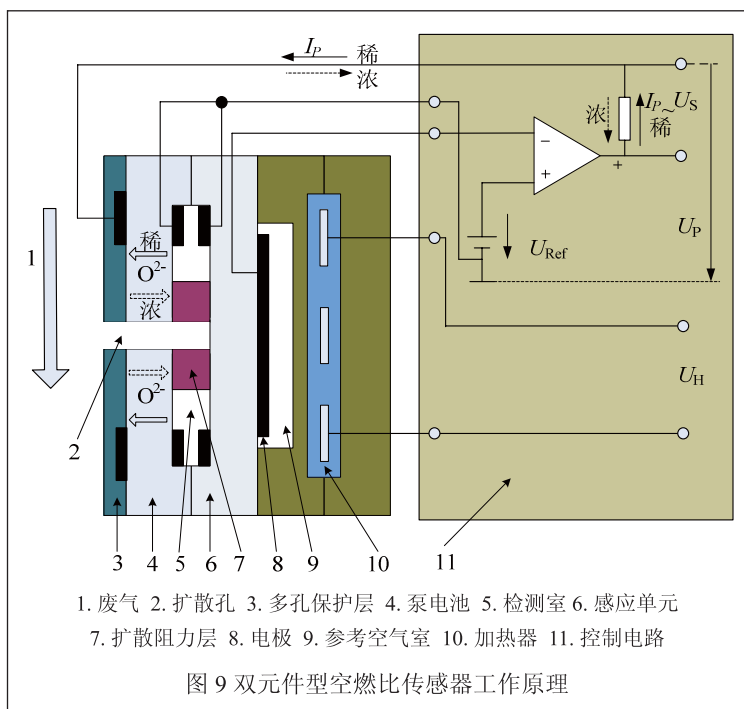


图 8 浓混合气检测原理



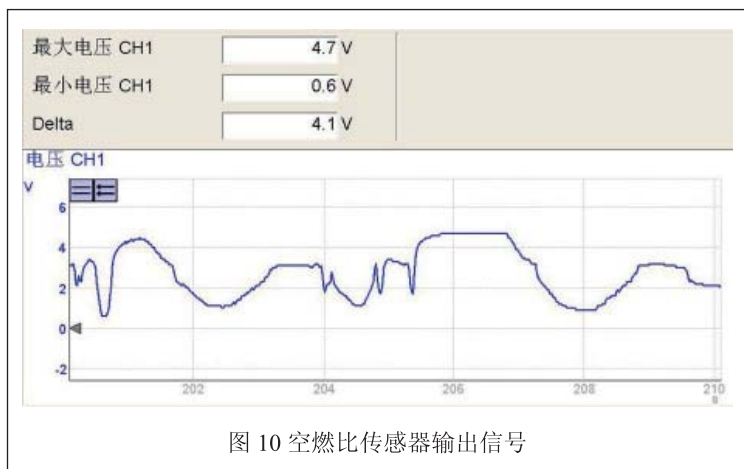
生高于或低于参考电压 ($U_{ref}=0.45V$) 的电压信号, 该电压信号输入到运算放大器的反向输入端。

当可燃混合气为理论空燃比时, 此时感应单元产生信号电压等于参考电压为 $0.45V$, 与参考电压 U_{ref} 相等, 运算放大器输出电压为 0 , 泵电池两侧无电势差, 所以泵电池不泵入或泵出氧, I_p 为 0 。

当可燃混合气为稀混合气时, 感应单元产生低于参考电压 U_{ref} 电压, 运算放大器输出的正电压加在泵电池的左侧, 在电场作用下泵电池从检测室中泵出多余的氧, 形成正向电流 I_p , 以维持检测室中的空燃比为理论空燃比, 如图9所示。

当可燃混合气为浓混合气时, 感应单元产生高于参考电压 U_{ref} 电压, 运算放大器输出的负电压加在泵电池的左侧, 由于泵电池右侧检测室内的电极与地连接, 所以泵电池两侧的等效电场为左侧负, 右侧正, 在电场作用下泵电池向检测室中泵入氧, 形成反向电流 I_p , 以维持检测室中的空燃比为理论空燃比, 如图9所示。

混合气的浓度不同, 泵电池泵入或泵出的氧气量也不同, 所以泵电流 I_p 与废气中的氧浓度一一对应, 也与混合气的空燃比一一对应, 泵电流 I_p 经控制电路处理后, 输出电压信号, 直接反应氧浓度。实测的空燃比传感器输出信号如图10所示。



废气中所含的氧气和未燃烧的碳氢化合物等非常少, 空燃比传感器的氧化锆内没有氧离子的迁移。因此, 空燃比传感器在混合气浓度在理论空燃比时不产生电流。

(2) 双元件型空燃比传感器结构及工作原理

以德国 BOSCH 公司生产的双元件型“平面式空燃比传感器”为例 (LSU 系列氧传感器当温度在 $750^{\circ}C$ 时处于最佳工作状态), 结构如图9所示。它由加热器、参考空气室、检测室、感应单元、泵电池及控制电路等组成。其中泵电池和感应单元为氧化锆材料的固体电解质。

废气由扩散孔经扩散阻力层进入检测室, 当废气中氧浓度变化时, 感应单元和传统氧传感器一样, 能够感知废气中氧浓度的变化, 并产

三、汽车用氧传感器的发展趋势

(1) 传统氧化锆式氧传感器只能检测出氧浓度是稀还是浓, 只有这稀和浓这两个状态, 不能检测浓和稀得程度, 而且信号微弱, 抗干扰性差, 但价格便宜, 目前很多中低档车型仍在用。新型空燃比传感器, 检测范围广, 精度高, 燃油喷射修正更加精确, 但价格稍贵, 目前多在中高档车型上应用。随着排放法规的标准的提高, 传统的氧化锆式氧传感器逐渐被新型的空燃比传感器取代^[11]。

(2) 随着新材料、新原理的发现和微电子技术的发展, 将会对现有氧传感器进行改进, 通过对传感器结构的优化设计, 使传感器的处理电路集中在一个单独的控制芯片上, 使氧传感器向着小型化、集成化方向发展。

(3)目前国内外的氧传感器多为加热式氧传感器,且工作温度很高,但温度过高会影响传感器的寿命^[12],所以随着新工艺、新材料的发展和应用,未来氧传感器的发展将会朝着降低工作温度、提高抗劣化性的方向发展。

四、结束语

介绍了氧化锆式氧传感器在汽车排放控制系统中的作用,从结构组成、工作原理、信号特性及应用情况等几个方面对国内外主导的几类氧化锆式氧传感器进行了论述,比较分析了传统氧传感器、单元件型空燃比传感器以及双元件型空燃比传感器的优缺点,总结得出了新型空燃比传感器将逐步取代传统氧传感器,并且随着汽车排放法规标准的提高,研究开发性能可靠、工作温度低、精度合适、性价比高的汽车用氧传感器,对实现汽车的节能环保具有很大的现实意义。

参考文献

- [1] 全国汽车维修专项技能认证技术支持中心编写组. 发动机性能 [M]. 北京: 教育科学出版社, 2003:126-127.
- [2] 路顺, 林健, 陈江翠. 氧化锆氧传感器的研究进展 [J]. 仪表技术与传感器, 2007,(3):1-6.
- [3] 赵萍, 孙志成, 张枫. 电化学氧传感器技术现状 [J]. 计量与测试技术, 2012,39(11):48-50.
- [4] 张强, 林振汉, 唐辉, 等. Y_2O_3 掺杂 ZrO_2 基电解质材料的离子传导性能及研究进展 [J]. 稀有金属快报, 2008,27(3):1-4.
- [5] 邹恒琪, 蒋治成, 谢光远等. 汽车氧传感器的发展及研究 [J]. 汽车电器, 2008,(2):1-4.
- [6] 曹家喆. 汽车电子控制基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009:46-51.
- [7] 林平. 空燃比传感器在汽油发动机上的应用及其检测 [J]. 海峡科学, 2010,(12): 29-32.
- [8] 周跃刚. 宽范围空燃比传感器 [J]. 国外汽车, 1988,(6):18-24.
- [9] 范道钢. 空燃比传感器(一)、(二) [J]. 汽车维修与保养, 2006,(4):55-58.
- [10] 韩庆, 胡劲, 蒋丹宇. 汽车氧传感器用电极材料的研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2013,42(8):1746-1750.
- [11] 邓辉明. 为何空燃比传感器将取代氧传感器 [J]. 科协论坛, 2009,(12):86-87.
- [12] 徐雯, 修吉平, 肖建中. 氧化锆氧传感器浓差电池的测试研究 [J]. 仪表技术与传感器, 2013,(8):1-7.

Application status and development trends of ZrO_2 oxygen sensors in automobiles

HE Ze-gang, SHEN Rong-wei, HAN Jiong-gang

(School of Automotive and Transportation, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China)

Abstract: The importance of ZrO_2 oxygen sensors in vehicle emission control systems is introduced. Several main ZrO_2 oxygen sensors in worldwide are classified according to the air-fuel ratio scale. Traditional cup type ZrO_2 oxygen sensors, planar ZrO_2 oxygen sensors and new type of air-fuel ratio sensors are discussed at the aspects of structural components, working principles, signal characteristics and application. Working mechanism of unit type air-fuel ratio sensors and double element air-fuel ratio sensors are discussed emphatically. The advantages and disadvantages of ZrO_2 oxygen sensors are analyzed. The conclusion is giving that the new air-fuel ratio sensors will replace traditional oxygen sensors gradually. In the future, wider detection range, lower working temperature and smaller volume have become the developing trends of automobile oxygen sensors.

Keywords: vehicle; emission control system; air-fuel ratio; ZrO_2 oxygen sensor; development trend

作者简介

何泽刚, 天津职业技术师范大学汽车与交通学院, 硕士研究生, 主要研究方向为汽车电子控制技术。

通信地址: 天津市河西区大沽南路 1310 号

邮编 300222

邮箱: hezegang@sina.com

申荣卫, 天津职业技术师范大学汽车与交通学院, 教授, 博士, 硕士研究生导师, 主要研究方向为汽车电子控制技术。

韩炯刚, 天津职业技术师范大学汽车与交通学院, 硕士研究生, 主要研究方向为汽车电子控制技术。