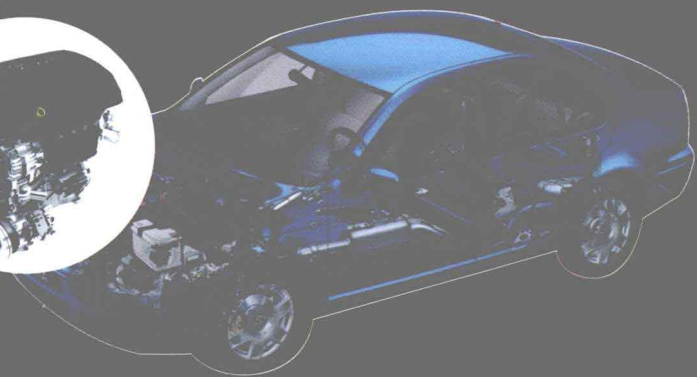


车用发动机 冷却系统 仿真与控制

李文 著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

图书在版编目(CIP)数据

车用发动机冷却系统仿真与控制 / 李文著. —北京:
国防工业出版社, 2011.8

ISBN 978-7-118-07700-1

I. ①车… II. ①李… III. ①汽车-发动机-冷却系
统-系统仿真 IV. ①U464

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 185600 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 4 字数 130 千字

2011 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 29.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

随着交通安全、能源危机和环境污染问题的日益显现,人们对汽车动力性和经济性的要求越来越高,在减小汽车的排放污染,提高安全性和使用寿命等方面进行着广泛的研究。发动机冷却系统的工作特性和智能控制便是其中的研究领域之一。这是由于正常的工作温度是保证发动机良好的工作性能及其使用寿命的一个重要条件,冷却系统既要防止发动机过热,也要防止冬季发动机过冷。因此,研究冷却系统的有效控制,使之根据发动机的工况始终保持在最佳工作状态具有重要的意义。

车用发动机的工作是一个复杂的系统工程,涉及到热力学、化学反应动力学、流体动力学、传热学等多门学科。建立工作过程数值计算的数学模型,通过计算机求解,可以比较深入地了解工作过程中参数变化的规律及结构参数、工况条件等因素对工作过程影响的程度,进而与实验相互补充,形成对发动机工作过程进行比较全面、深入的分析研究方法,对发动机冷却系统的研究有着重要参考价值。本书充分利用现在流行的仿真软件,对车用发动机工作过程仿真的基础上,对转速、压缩比、点火提前角等参数对发动机的输出功率和扭矩等性能的影响进行了详细的分析和研究,力求全面掌握发动机的工作特点,本着优化发动机传热及热负荷的目标,分析和研究冷却系统零部件的协调工作和整体控制策略。在第二章、第三章、第

四章分别利用 AVL 系列软件分别对汽油、柴油发动机的工作过程进行了建模和仿真;利用 CFD 软件对发动机冷却水套的流场进行了建模和仿真;利用 Matlab 对电子节温器的模糊控制进行了建模和仿真。利用单片机控制电机、阀门等执行器进行实验,证明仿真模型和仿真结果的有效性。

本课题的研究及本书的编写得到了中国计量学院李孝禄教授、李迎等老师的指导和帮助,在此表示感谢。

由于本书研究内容涉及面广、实验测试和实验研究的难度大,加之作者理论、实践水平有限,书中难免存在不妥之处,望读者不吝指正。

著者

2011年6月

目 录

第一章 车用发动机冷却系统简介	1
1.1 水冷系统概述	1
1.1.1 冷却液	1
1.1.2 水冷式冷却系统的组成	2
1.2 水冷系统主要零部件	2
1.2.1 散热器	2
1.2.2 散热器盖	2
1.2.3 补偿水箱	3
1.2.4 冷却风扇	3
1.2.5 水泵	4
1.3 水冷系统冷却强度的调节	5
1.3.1 节温器	5
1.3.2 百叶窗	6
1.3.3 风扇离合器	7
第二章 车用发动机工作过程仿真	8
2.1 概述	8
2.1.1 工作过程数值计算数学模型	8
2.1.2 工作过程数值仿真中的基本假设	10
2.1.3 基本参数的计算	10
2.1.4 缸内热力过程计算	11

2.2	基于 AVL BOOST 的发动机工作过程仿真实例	15
2.2.1	AVL BOOST 介绍	15
2.2.2	某四缸汽油机工作过程模拟计算	16
2.2.3	某六缸增压柴油机工作过程模拟计算	30
第三章	车用发动机冷却水套流动仿真	58
3.1	概述	59
3.2	CFD 软件简介	62
3.3	三维湍流 CFD 仿真实例	68
3.3.1	流体运动控制方程	68
3.3.2	控制方程的离散化	72
3.3.3	离散方程的求解	75
3.3.4	流动边界条件确定	75
3.3.5	CFD 仿真过程	77
第四章	车用发动机冷却系统智能控制	84
4.1	车用发动机电控技术现状及发展趋势	84
4.2	车用发动机电控冷却系统的组成和设计	85
4.2.1	电控冷却系统的组成	86
4.2.2	电控冷却系统的硬件设计	88
4.2.3	电控冷却系统的软件设计	92
4.3	电子节温器的模糊控制	95
4.3.1	模糊控制方法简介	95
4.3.2	电子节温器的模糊控制实例	97
4.3.3	电子节温器模糊控制系统仿真	102
参考文献	118

第一章 车用发动机冷却系统简介

汽车是集机械、电子技术为一体的高科技产品,电子技术几乎应用到汽车的各个领域,各种电子部件和控制方法日渐成熟。但是随着交通安全、能源危机和环境污染问题的日益显现,人们对汽车的要求也越来越高,在提高汽车的动力性和经济性,减小汽车的排放污染,提高安全性和使用寿命方面存在很多不完善、不理想的地方,发动机的冷却系统便是其中的研究领域之一。为全面深入掌握冷却系统的控制方法,有必要了解发动机冷却系统的组成和现状。

1.1 水冷系统概述

水冷系统是以冷却液为冷却介质,热量先由机件传给冷却液,靠冷却液的流动把热量带走而后散入大气中。散热后的冷却液再重新流回到受热机件处。适当调节水路和冷却强度,就能保持发动机的正常工作温度。这种冷却方法的优点是:冷却比较均匀,可使发动机稳定在最有利的水温下工作,运转时噪声比风冷系小。同时,还可用热水预热发动机,便于冬季启动。

1.1.1 冷却液

冷却液是水与防冻剂的混合物。水的冰点为 0°C ,如果发动机冷却系统中的水结冰,发动机机体、汽缸盖和散热器将会膨胀。为了防止冷却液冻结,在水中加入防冻剂制成冷却液。最常用的防冻剂是乙二醇。冷却液中水与乙二醇的比例不同,其冰点也不同。在水中加入防冻剂还同时提高了冷却液的沸点。例如,含

50% 乙二醇的冷却液在大气压力下的沸点是 103℃。

防冻剂中通常含有防锈剂和泡沫抑制剂。防锈剂可延缓或阻止发动机水套壁及散热器的锈蚀或腐蚀。泡沫抑制剂能有效地抑制泡沫的产生。在防冻剂中,一般还要加入着色剂,使冷却液呈蓝绿色或黄色,以便识别。

1.1.2 水冷式冷却系统的组成

车用发动机的水冷式冷却系统大都采用强制循环冷却方式。强制循环水冷系统由风扇、散热器、水泵、发动机机体和汽缸盖中的水套、温度调节装置(节温器、百叶窗、风扇离合器)、水管、水温表和传感器以及其他附属装置等组成。

大多数汽车装有暖风系统。暖风机是一个热交换器,也可称作第二散热器。在装有暖风机的水冷系统中,热的冷却液从汽缸盖或机体水套经暖风机进水软管流入暖风机芯,然后经暖风机出水软管流回水泵。吹过暖风机芯的空气被冷却液加热之后,一部分送到挡风玻璃除霜器,一部分送入驾驶室或车厢。

1.2 水冷系统主要零部件

1.2.1 散热器

散热器的功用是将冷却液所携带的热量散入大气以降低冷却液温度。它是强制循环冷却系统中的主要部件,由进水室、出水室和散热器芯等三部分组成。冷却液在散热器芯内流动,空气在散热器芯外通过。热的冷却液由于向空气散热而变冷,冷空气则因为吸收冷却液散出的热量而升温,所以散热器是一个热交换器。

1.2.2 散热器盖

车用发动机采用的闭式强制循环冷却系统是一个密闭的系统,都用散热器盖严密的盖在散热器加冷却液口上。这种密闭系

统可以减少冷却液的外溢及蒸发损失,还可以提高系统的蒸汽压力,提高其中冷却液的沸点。由于冷却液温度和外界气温温差加大,也就提高了整个冷却系统的散热能力。系统内的压力可提高到 98kPa ~ 196kPa,冷却液的沸点可相应的提高到 120℃左右。由于散热能力的提高,可以相应的减小散热器的尺寸。但是系统内冷却液压力如果过大,就可能使散热器芯的焊缝或水管破裂。当冷却系中的水蒸气凝结时,会使系统中的蒸汽压力低于外界大气压力,如果这个压力过低,散热器芯部就可能被大气压坏。因此闭式冷却系的散热器盖上装有真空—压力阀。其作用是密闭水冷系统并调节系统的工作压力。当把散热器盖盖在散热器加冷却液口上并锁紧时,散热器盖的上密封衬垫在压力阀弹簧的作用下与加冷却液口的上密封面贴紧,散热器盖的下密封衬垫与加冷却液口的下密封面贴紧,这时水冷系统是封闭的。

1.2.3 补偿水箱

补偿水箱由塑料制造并用软管与散热器加冷却液口上的溢流管连接,其作用如上所述,即当冷却液受热膨胀时,部分冷却液流入补偿水箱;当冷却液温度降低时,冷却液又被吸回散热器,所以冷却液不会溢失。补偿水箱内的液面时高时低,而散热器总是充满冷却液。在补偿水箱的外表面上刻有“高”、“低”两条标记线,补偿水箱内的液面应位于两条标记线之间。补偿水箱多用半透明材料制成,透过箱体可直接方便的观察到液面高度,无需打开散热器盖。

1.2.4 冷却风扇

风扇的作用是提高流经散热器的空气流速和流量,以增强散热器的散热能力并冷却发动机附件。水冷系的风扇要求足够的风量、适度的风压、功率消耗少、功率高、噪声低以及工艺简单。

在传统的水冷系中常用的是轴流式风扇。当发动机在车架上纵向布置时,风扇和水泵一般安装在同一轴上,并由驱动水泵和发

电机的同一根 V 带传动。为了保证风扇、水泵的转速, V 带应有一定的张紧力。随着汽车电子控制技术的发展, 现在大多数轿车和发动机横置或后置的汽车采用电动风扇。电动风扇由风扇电机驱动并由蓄电池供电, 风扇转速与发动机转速无关。电动风扇具有结构简单, 布置方便, 并且不需要检查、调整或更换风扇皮带, 维修保养工作量少等诸多优点。

风扇电动机的开关由散热器的水温开关控制, 并且有高低速两个挡位, 低速挡在沸点内使用, 高速挡在沸点外使用。当冷却液流出散热器的温度为 $92^{\circ}\text{C} \sim 97^{\circ}\text{C}$ 时, 热敏开关接通风扇电动机 1 挡, 风扇转速为 $2300\text{r}/\text{min}$ 。当冷却液温度升高到 $99^{\circ}\text{C} \sim 105^{\circ}\text{C}$ 时, 温控开关接通风扇电动机 2 挡, 此时风扇转速为 $2800\text{r}/\text{min}$ 。若冷却液温度降到 $92^{\circ}\text{C} \sim 98^{\circ}\text{C}$ 时, 风扇电动机恢复到 1 挡转速。当冷却液温度降到 $84^{\circ}\text{C} \sim 91^{\circ}\text{C}$ 时, 温控开关切断电源, 风扇停转。

在有些电控系统中, 电动风扇由电控单元控制。冷却液温度传感器向电控单元传输与冷却液温度相关的信号。当冷却液温度达到规定值时, 电控单元使风扇继电器接通, 继电器触点闭合并向风扇电动机供电, 风扇进入工作。

1.2.5 水泵

在强制循环冷却系中使用水泵对冷却液加压, 使之在冷却系统中循环流动。由于离心式水泵具有结构简单、尺寸小、出水量大、工作可靠、制造容易以及损坏后不妨碍水在冷却系中自然循环等优点, 所以得到广泛应用。常见的水泵在机体外安装, 与风扇同轴驱动。也有的装在机体内(内藏式)单独驱动的。

离心式水泵由水泵壳体、水泵轴、叶轮及进、出水管等组成, 由曲轴驱动的水泵叶轮逆时针转动时, 带动水泵中的水一起旋转。由于离心力的作用, 水被甩向叶轮边缘产生一定的压力, 在蜗形壳体内将动能转变为压力能, 经外壳上与叶轮成切线方向的出水管被压送到发动机水套内。与此同时, 在叶轮中心处, 由于水被甩向外缘而压力降低, 水箱或散热器中的水便经进水管被吸进叶轮中

心部分。

1.3 水冷系统冷却强度的调节

发动机冷却系统的散热能力是按照其常用工况和气温较高的情况下能保证可靠的冷却而设计的。但汽车在行驶过程中,由于环境条件和运行工况的变化,发动机的热状态也在改变。因此,必须随时调节发动机的冷却强度。强制式水冷系统的冷却强度一般受汽车的行驶速度、水泵和风扇的转速及外界气温的影响。当使用条件变化时,如外界气温高,发动机在低速大负荷情况下工作,要求冷却强度要强,否则发动机容易过热;而当外界气温低,发动机负荷又不大时,其冷却强度应弱些,否则会使发动机过冷。因此,要保证发动机在最佳的温度下工作,不出现过热过冷现象,就必须能根据使用条件的变化自动调节发动机冷却强度,使需要从冷却系统散走的热量与冷却系统的散热能力相协调。冷却强度的调整方法有两种:一是改变冷却液的流量和循环路线;二是改变流经散热器的空气流量和流速。冷却系统中改变冷却液的流量和循环路线的装置是节温器,改变流经散热的空气流量和流速的装置有百叶窗和风扇离合器。

1.3.1 节温器

冷却液将高温零件的热量带走后,并在流经散热器时将热量散入大气。若减少流经散热器的流量,则会使散热量减少,整个冷却系统的温度将会提高。节温器的功能就是随发动机负荷和水温的大小而自动改变冷却液的流量和循环路线,保证发动机在适宜的温度下运行,减少燃料消耗和机件的磨损。

节温器安装在汽缸盖出水口附近水道中。现代汽车多用蜡式节温器。蜡式节温器有单阀型和双阀型两种。常温下石蜡呈固态,水温低于 349K (76℃) 时,大循环阀完全关闭,小循环阀完全开启,由汽缸盖出来的水经旁通管直接进入水泵,称之为小循环。

由于水只是在水泵和水套之间流动,不经过散热器,且流量小,所以冷却强度弱。当发动机水温达到 349K(76℃)左右时,石蜡逐渐变成液态,体积随之增大,迫使橡胶管收缩,从而对中心杆下部锥面产生向上的推力。由于杆的上端固定,故中心杆对橡胶管及感应体产生向下的反推力,克服弹簧张力使大循环阀逐渐打开,小循环阀开度逐渐减小。

当发动机内的水温升高到 359K(86℃)时,大循环阀完全开启,小循环阀完全关闭,冷却液全部流经散热器,称为大循环。由于此时冷却液流动路线长,流量大,冷却强度高。当冷却液温度在 349K~359K(76℃~86℃)之间时,大小循环同时进行。

节温器的布置方式有两种:出口温度控制方式(传统式)和进口温度控制方式(新款式)。进口水温控制方式。该控制方式是将节温器安装在水泵进水管口中,其优点有:

(1) 该处的液体温度比出水口低大约 10℃左右,其温度和压力较稳定,大小循环阀的开启是顺流方向动作,开闭振荡小,可延长节温器的使用寿命。

(2) 小循环路线短,缩短了暖机时间,降低了热启动油耗,减少了发动机磨损。实验证明:热启动时间缩短了一半,冷启动后 2min 内,冷却液的温度即达到 60℃,满足了起步行车的要求。

1.3.2 百叶窗

百叶窗安装在散热器前面,由许多活动挡板组成。挡板垂直或水平安装,由驾驶员通过驾驶室的手柄操纵其开闭,也可用感温器自动控制。百叶窗的作用是在冷却液温度较低时改变吹过散热器的空气流量,从而控制冷却强度。用来感受来自发动机冷却液温度的感温器安装在散热器进水管上。在发动机冷启动及暖车期间,百叶窗关闭。当发动机达到正常工作温度后,感温器打开空气阀,压缩空气进入空汽缸,推动空汽缸内的活塞连同调整杆一起下移,带动杠杆开启百叶窗。

1.3.3 风扇离合器

风扇的动力来自于发动机功率,最大时消耗功率约为发动机总功率的 10%,其数量是相当可观的。但是,水冷系统真正需要风扇工作的时间却只有 25% 左右。而在冬季,风扇的工作只有 5% 的时间是有用的,其他时间风扇所消耗的功率纯属浪费。例如当发动机在高速小负荷工况运行时,需要散走的热量减少,因此可以相应的减少流经散热器的冷却风量。但是传统的发动机冷却风扇由曲轴以固定速比驱动。在这种情况下,风扇的风量不会自动减少,因而使冷却液的温度过低。为了保持合适的冷却液温度,在高速小负荷工况下,应减小风扇的转速,使风量相应的减少。风扇离合器即用来控制风扇的转动,调节冷却强度,以降低风扇功率消耗,减少噪声和磨损,防止发动机过冷,以节约燃料。

风扇离合器有硅油风扇离合器、机械式风扇离合器和电磁风扇离合器等多种类型。在此不再做详细介绍。

第二章 车用发动机工作过程仿真

发动机工作过程的研究是实现良好动力性、经济性及排放性指标的基础。发动机工作过程是一个非常复杂的系统,涉及到热力学、化学反应动力学、流体动力学、传热学等多门学科。建立工作过程数值计算的数学模型就是在一定的目的下,在各种精确度和复杂度的水平上把相关学科的计算公式有机的结合起来。通过计算机求解,可以比较深入地了解工作过程中参数变化的规律及结构参数、工况条件等因素对工作过程影响的程度,进而与实验相互补充,形成对发动机工作过程进行比较全面、深入的分析研究方法,对发动机冷却系统的研究有着重要参考价值。自 20 世纪 70 年代以来,随着快速、大容量计算机和数据处理系统在发动机研究中的广泛应用,使发动机热力循环模拟成为可能,发动机设计也由过去的经验、半经验公式向着模拟计算、优化设计和发动机 CAD 方面过渡,并取得了一系列新的进展。

2.1 概述

2.1.1 工作过程数值计算数学模型

目前,用以描述控制发动机性能及排放过程的数学方程为以能量守恒为理论基础的热力学模型,可分为零维模型、准维模型及多维模型三种。

(1) 零维模型。又称热力学模型,该模型把整个汽缸看作均匀场,不考虑参数随空间位置的变化(单区模型),即将缸内工质的压力、温度与成分视为均匀分布,并按热力学第一定律进行热力

过程的计算。如林慰梓的三角形法、Whitehouse 的单区模型等。该模型可了解燃烧室内宏观参数和现象随时间而变化的规律,并可预测放热速率。

(2) 准维模型。又称燃烧现象模型,该模型不考虑空间分布,但从燃烧区域、已燃气体区域、喷雾等现象出发,考虑几个区域以及这些区域中各种参数随时间的变化。该模型和零维模型一样,也是利用热力学原理分析燃烧过程,其控制方程也是以时间为唯一变量的常微分方程。但较之零维模型的单区化,准维模型则对空间做了分区处理,各区之间的参数不相同(多区模型),从而能在一定程度上反映缸内参数随空间的变化,如林慰梓的油汽射流模型和广安的油滴模型。准维燃烧模型最大的特点就是抓住了喷雾混合是控制燃烧过程的关键这一事实。

(3) 详细的多维模型。又称流体动力学模型。该模型考虑汽缸内现象的二维或三维空间分布的模型。它是通过求解完全受物理、化学过程支配的基本微分方程,并刻画气流速度、紊流特性、燃料和燃烧生成物的浓度等详细信息的三维构造的数学模型。该模型一般由模拟缸内各个物理化学过程的若干子模型组成,如气体流动模型、燃油喷雾模型、传热模型等。所以,要建立一个完整的发动机燃烧多维模型,必须综合运用热力学、流体力学、传热传质学、化学反应动力学和数值分析等学科的理论。这种方法目前尚未成熟。

不同的工作过程需采用不同的计算模型,不同的目的也应采用不同的模型,这是由于发动机工作过程的复杂性和对工作过程的理解水平所限造成的,所以尚不能只从基本的控制方程来建立模型用于预测发动机的工作状况。在开发任何模型时必须明确规定其目标,模型的结构和具体范围应与目标相适应,即企图建立描述发动机运行所有主要方面的模型是不可能的,而在有限的目标下则是可行的。此外,由于同样的原因,现有的模型在理论上都不完善,需要采用经验关系式及近似的方法来填补对关键性现象的理解和描述。

2.1.2 工作过程数值仿真中的基本假设

发动机汽缸中的热力学过程是相当复杂的,它包括有机械、物理、化学、热传导与流动等过程。尤其是燃烧过程,各处的温度和工质成分差别更大。在采用零维燃烧模型的工作过程计算中,综合考虑模拟精度对结果的影响以及工作量的关系,采用容积法模型效果较好,在计算时对工质做如下假定:

(1) 汽缸内的状态是均匀的,即不考虑汽缸内各点的压力、温度和浓度的差异,并认为在进气期间,流入汽缸内的空气与汽缸内的残余废气实现瞬时的完全混合;

(2) 工质为理想气体,其比热、内能仅与气体温度和成分有关;

(3) 气体流入或流出汽缸为准稳态流动;

(4) 进出口的气体动能忽略不计。

2.1.3 基本参数的计算

零维模型的建立是以热力学第一定律和理想气体的状态方程为基础的,故在工作过程仿真中,必须计算相关的几何学参量(如容积)和热力学参量(如温度、压力、比热、内能等)及其变化规律。

汽缸的工作容积为余隙容积和扫气容积之和:

$$V_z = \frac{\pi D^2}{4} \left\{ \frac{S}{\varepsilon - 1} + \frac{S}{2} \left[\left(1 + \frac{1}{\lambda} \right) - \left(\cos \left(\frac{\pi}{180} \varphi \right) + \frac{1}{\lambda} \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \left(\frac{\pi}{180} \varphi \right)} \right) \right] \right\} \quad (2-1)$$

而汽缸容积的变化规律和活塞行程的变化规律一致,汽缸容积变化率:

$$\frac{dV_z}{d\varphi} = \frac{\pi^2 D^2 S}{8 \times 180} \left[\sin \left(\frac{\pi}{180} \varphi \right) + \frac{\lambda}{2} \frac{\sin \left(\frac{\pi}{180} \varphi \right)}{\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \left(\frac{\pi}{180} \varphi \right)}} \right] \quad (2-2)$$

2.1.4 缸内热力过程计算

在上述假定下,缸内气体可以用3个基本参数(m, p, T)构成的3个方程,即能量守恒、质量守恒和气体状态方程来描述,其数学表达式如下:

$$\frac{d(m_z U_z)}{d\varphi} = \frac{dQ_f}{d\varphi} + \frac{dm_e}{d\varphi} h_e - \frac{dQ_w}{d\varphi} - p_z \frac{dV_z}{d\varphi} \quad (2-3)$$

$$\frac{dm_z}{d\varphi} = \frac{dm_d}{d\varphi} - \frac{dm_e}{d\varphi} + g_f \frac{dx}{d\varphi} \quad (2-4)$$

$$p_z V_z = m_z R_z T_z \quad (2-5)$$

图2-1所示为汽缸内的能量守恒关系式的物理意义:汽缸中的工质内能变化是由喷入燃油的燃烧热量 $dQ_f/d\varphi$, 进入汽缸新鲜空气带入的热量 $(dm_d/d\varphi)h_d$, 废气排出汽缸带走的热量 $(dm_e/d\varphi)h_e$, 工质与汽缸盖、缸套和活塞进行热交换的热量 $dQ_w/d\varphi$, 以及传给活塞的机械功所相当的热量 $p_z(dV_z/d\varphi)$ 所组成。将式(2-3)、式(2-4)带入式(2-5)整理得到温度随曲轴转角的变化规律式:

$$\frac{dT_z}{d\varphi} = \frac{\left(\frac{dQ_f}{d\varphi} - \frac{dQ_w}{d\varphi} - p_z \frac{dV_z}{d\varphi} + \frac{dm_d}{d\varphi} h_d - \frac{dm_e}{d\varphi} h_e - u \frac{dm_z}{d\varphi} - m_z \frac{\partial u}{\partial \alpha_k} \frac{d\alpha_k}{d\varphi} \right)}{m_z c_v} \quad (2-6)$$

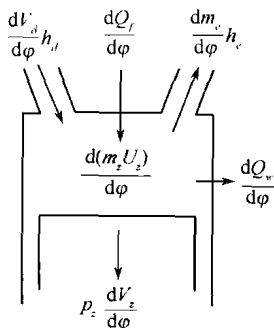


图2-1 汽缸内能量守恒简图