DOI:10.3969/j.issn.1001 -4551.2017.01.018

插电式混合动力汽车预测控制策略的研究*

姜顺明,周 柯
(江苏大学 汽车与交通工程学院,江苏 镇江 212013)

摘要:针对插电式混合动力汽车(PHEV)传统控制策略没有考虑未来车速的问题,通过对汽车未来行驶车速进行预测,在整车行驶模式下提出了一种把汽车未来车速信息考虑进当前的控制策略,从而实现了对发动机和电机转矩的合理分配。通过把新开发的基于车速信息的预测控制策略嵌入到 ADVISOR 中,在欧洲城市循环工况(NEDC)下进行了仿真分析。仿真结果表明:对汽车未来行驶车速进行预测的控制策略能够实现对发动机和电机转矩的进行合理分配,百公里油耗约为 6.5L,相比基于规则控制策略燃油经济性提高了约 7.14%,而且排放也有所降低,从而验证了基于预测信息的控制策略的有效性。

关键词:插电式混合动力汽车;未来行驶车速;预测控制模型;ADVISOR 仿真分析
中图分类号:TP273;U462.3 +4 **文献标志码:**A **文章编号:**1001 -4551(2017)01 -0088 -06

A research on the predictive control strategy of a plug-in hybrid electric car

JIANG Shun-ming, ZHOU Ke
(School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Aiming at the problem of no considering the future vehicle speed for plug-in hybrid (PHEV) traditional control strategy, by predicting the future speed, a predictive future speed control strategy was proposed under the vehicle travel mode, and a reasonable distribution of the engine and the motor torque was achieved. By embedding the development of new predictive control strategy in ADVISOR, and the simulations were conducted under the NEDC. The results show that: the future of the automobile with the speed control strategy can be predicted on the engine and the motor torque rational allocation, about hundred kilometers 6.5L, fuel economy is improved by about 7.14%, but emissions is also reduced, so verify based prediction information control policy effectiveness.

Key words: PHEV; the future speed; predictive control strategy; ADVISOR simulation

0 引 言

随着对环保和节能需求的提高,许多汽车制造商和研究机构开始研究如何控制汽车的排放和提高发动机和电机的工作效率[1]。PHEV 具有纯电动汽车和混合动力汽车的双重优点,其燃油经济性和排放主要由两方面决定:一是各部件参数的配置,二是制定合理的能量管理控制策略。在整车参数选取的情况下,制定合理的控制策略是保证其良好的燃油经济性和排放的核心,因此对 PHEV 控制策略的研究成为插电式混合动力汽车的研究重点。当前对于混合动力汽车控制策略的研究主要包括基于简单规则、实时优化和全局优化控制策略。插电式混合动力汽车根据开发目的和使用环境的不同选择不同的控制策略从而达到最佳的动力性能、最佳的燃油经济性和较长的续驶里程[2]。然而随着对混合动力汽车控制策略研究的深入,国内外研究者们越来越注意到汽车道路信息(车速、道路坡度、交通信号灯等)的变化对汽车能量管理策略的影

收稿日期:2016 -06 -15
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51575239)
作者简介:姜顺明(1976 -),男,江西余江人,副教授,主要从事新能源汽车控制策略方面的研究. E-mail:seujsm@163.com

响[3]。在同样的汽车部件参数配置、同种控制策略下不同的路况信息对汽车性能的影响是很大的。因此把汽车未来行驶信息加入到整车控制策略中非常重要。文献[4]研究了插电式混合动力汽车未来行驶状况,主要对汽车未来车速进行了预测研究。文献[5]提出了利用模糊控制算法对汽车未来车速和道路坡度信息进行处理,然后把他们作为输入,最后输出电池充放电的控制信号来应对汽车未来路况的变化。

本研究针对一款传统并联式插电式混合动力汽车,对其基于规则的控制策略进行研究,从而提出建立基于预测信息的整车控制策略[6],根据整车动力模型进行了仿真分析,并与传统基于规则的控制策略分析结果相比较,从而验证基于预测信息的控制策略能有效地提高燃油经济性、降低汽车排放。

1　PHEV 动力系统参数及构成

本研究对象是由一款传统汽车改造而成,在整车参数不改变的情况下,主要对其动力系统进行了重新设计,从而满足整车目标性能。经过动力系统参数的选取,改造后的发动机选取小排量(1.5 L)的四冲程汽油发动机,电机选用永磁同步电机,电池选用容量为 11 kwh 的锂离子电池。其动力系统参数匹配结果如表 1 所示。

表 1　动力系统参数

主要部件	部件参数	数值
发动机	发动机类型	四冲程汽油发动机
	最大功率/(kw)	40
电机	电机类型	永磁同步电机
	峰值功率/kw	33
	额定功率/kw	18.3
	峰值转速/r · min^{-1}	7 000
	额定转速/r · min^{-1}	1 750
	峰值转矩/(Nm)	58.75
	额定转矩/(Nm)	32.64
电池	电池类型	锂离子电池
	额定功率/kw	45
	容量/kwh	11

在结构上整车采用并联式,其整个动力传动系统包括发动机、电机、转矩耦合器、蓄电池组、功率转换器等。发动机和电机作为动力源既可以通过转矩耦合器联合驱动汽车又可以各自单独驱动汽车。同时在汽车减速或者制动时电机可以通过功率转换器反过来作为发电机发电,从而给蓄电池充电。该 PHEV 的动力传递路径为:发动机或者电机的动力通过耦合器传递给离合器,经过离合器传递给主减速器,主减速器再将动力通过差速器传递给车轮。其动力总成结构示意图如图 1 所示。

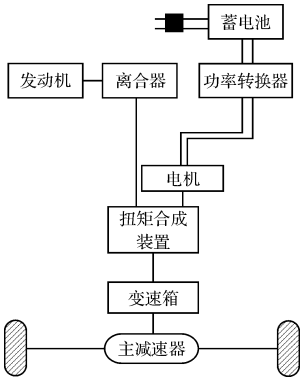


图 1　插电式混合动力汽车传动系统结构图

2　PHEV 基于未来车速的预测控制策略建立

合理的控制策略是降低 PHEV 燃油经济性和排放的关键所在。因此本研究根据对汽车未来行驶路况信息(车速)提前预测,从而把它考虑进整车控制策略中,合理的分配发动机和电机之间的转矩[7],从而在不同的路况信息下提前对电池进行充放电,从而使整车获得良好的燃油经济性、优异的排放性能。

本研究设计的 PHEV 根据输入信号(电池 SOC)选择进入纯电动模式、混合动力模式或者制动发电模式。其工作流程如图 2 所示。

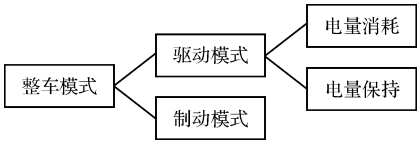


图 2　PHEV 工作流程图

2.1　整车工作模式

根据电池 SOC、汽车速度信息、需求功率不同,PHEV 可以工作在 2 个不同的工作模式:驱动模式和制动模式。而在驱动模式汽车又分为两个不同的阶段:电量消耗和电量保持。

为了保证锂电池在工作过程中有较好的充放电效率,必须合理地设定电池的工作范围。笔者在研究过程中发现,电池充放电内阻与 SOC 的变化曲线图如图 3 所示。

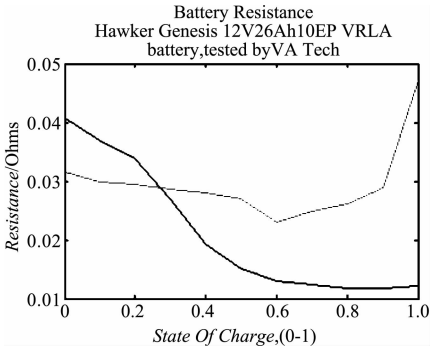


图 3　电池充放电内阻与 SOC 变化曲线

由图可大致确定 SOC 的最大最小值在 0.2 ~ 0.8 之间,因为在这一范围内电池的内阻最小,充放电效率较高。

电量消耗(charge depleting,CD):这个阶段电池电量充足,主要利用电网获得的廉价电能驱动汽车,只有在需求功率较大时发动机才会开启,发动机开启值由电池 SOC、需求功率决定,电池 SOC 在这个阶段一直降低。

电量维持(charge sustaining,CS):当电池 SOC 降低到一定值时,发动机驱动并为电池充电,从而使电池 SOC 维持在一个相对稳定的状态。

PHEV 通过电池 SOC 判断汽车行驶模式,在不同的工作模式下执行不同的控制策略,通过合理分配发动机和电机工作点,使其运行在燃油经济性较好的区域。当电池 SOC > 0.5 时,PHEV 就执行电量消耗(CD)模式,利用廉价的电能最大限度地为整车提供驱动力,从而使汽车工作在纯电动模式减小汽车的排放。当电池下降到目标值 0.5 时,就开始限制电机功率输出,进入电量保持阶段,这时通过未来车速信息的变化来提前给电池充放电,从而使电池维持在一定的范围[8]。当电池 SOC 下降到最低值时,控制规则放电命令就会取消,从而有效的保护电池。而当车辆减速或者制动时,就可以通过回收部分能量进行再利用,从而提高整车能量利用率,节约使用成本。

综上所述,本研究设计的控制策略使 PHEV 工作在纯电动模式、发动机工作模式、制动模式,在不同的工作模式,执行不同的控制规则,从而完成发动机和电机的转矩分配提高整车的燃油经济性。

2.2　纯电动模式

在纯电动模式,电机作为主要驱动源一直提供整车动力,电机提供的转矩只需满足需求转矩即可。

此时电机输出转矩大小:

$$n_e = f_1(ACC, v) \tag{1}$$

2.3　混合驱动工作模式

当车辆需求功率较大或者电池电量下降到目标值时,发动机就会大部分时间处于开启状态,因此 PHEV 就执行预测控制策略。主要控制思想通过比较汽车当前车速与未来车速的差值来决定给电池充电还是放电,具体规则就是:如果未来车速较高,就可以提前让电池进行发电,让整车工作在电动模式,损失的电能可以通过在未来车速较高时采用发动机工作在高效区给电池充电弥补过来;如果未来车速较低,就让发动机给电池进行充电,这样就可以避免在未来车速较低时发动机工作在低效区,从而提高发动机的燃油经济性;如果未来车速不变,则就无变化,此时通过判断电池 SOC 来让电池维持在稳定值附近。

对于汽车未来车速本研究采用在汽车行驶的前方路线上选取一个合理的预测距离,然后在预测距离中选取一些采样点,通过循环工况的数据信息可以获得每个采样点的车速,然后通过对采样点的车速进行求平均值的方法求得汽车未来车速[9],预测距离内采样点的选取如图 4 所示。

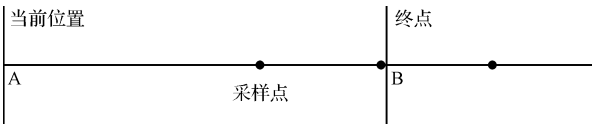


图 4　预测距离内采样点的选取

图 4 中,A 点时当前位置点,B 点为预测终点位置,通过在选取 N 个采样点,每个采样点车速值为 V_i,则汽车未来车速为:

$$V_{\text{future}} = \frac{\sum_{k=1}^{N} V_i}{N} (i = 1, 2, \cdots, N) \tag{2}$$

未来车速增加时电池放电,电机输出转矩大小为:

$$T_m = \begin{cases} T_e, SOC > cs_lo_soc \\ 0, SOC < cs_lo_soc \end{cases} \tag{3}$$

式中:cs_lo_soc— 电池最低值,一般设为 0.6。

未来车速较低电池充电时,充电转矩为:

$$T_m = \frac{30 P_{m_{out}}}{\pi n_m \eta} \tag{4}$$

式中:P_{m_out}— 电机输出的充电功率,n_m— 转速,η— 发电效率。

未来车速无变化,则充电转矩为:

$$T_{\text{add}} = \frac{T_{\text{cs_charge}} \times \left(\frac{cs_hi_soc + cs_lo_soc}{2} - SOC \right)}{\left(\frac{cs_hi_soc - cs_lo_soc}{2} \right)} \tag{5}$$

式中:cs_hi_soc— 电池最大值,cs_lo_soc— 电池最低值

该充电转矩主要是将当前电池 SOC 与上下限值进行对比,使正常行驶时 SOC 维持在预定值附近。

2.4　制动发电控制策略

汽车在制动时制动时间一般很短,电机短时间大功率发电产生的电流很可能超过电池充电电流的上限,影响电池寿命,因此本研究采用汽车减速时就发电,制动时采用更大的扭矩发电。PHEV 制动过程电机发电扭矩为:

$$T_m = \begin{cases} T_{mc}, K_{acc} = 0 \\ T_{m_max} k_{bat}, K_{acc} > 0 \end{cases} \tag{6}$$

式中:T_{mc}— 减速滑行时的发电扭矩,T_{m_max}— 制动时产生的最大扭矩,k_{bat}— 电池发电影响系数。

3　PHEV 能量管理策略仿真分析比较

3.1　建立模型

本研究在确定了 PHEV 预测信息的能量管理策略后,以降低发动机油耗和排放为目的,同时拥有足够的动力性能和驾驶性能,对整车建立的控制策略模型进行仿真分析。为了验证整车的能量管理策略,本研究依据 PHEV 动力总成布置结构以及每个部件的类型和性能参数,在 Matlab/Simulink 开发平台下,对传统基于规则控制策略进行修改加入车速信息的预测控制策略模型,同时建立 PHEV 整车模型[10](发动机模型、电机模型、电池模型、整车动力学模型等),通过修改整车 m 文件[11],把所制定的基于预测信息的控制策略嵌入到仿真软件中,同时修改整车动力参数,在给定的新欧洲城市循环工况(NEDC)下进行仿真分析,使整车分别运行在电量消耗(CD)和电量保持(CS)阶段,根据上述制定的 PHEV 能量管理策略合理的分配发动机和电机的动力输出。

3.2　仿真结果分析

电池 SOC 随时间的变化曲线如图 5 所示。

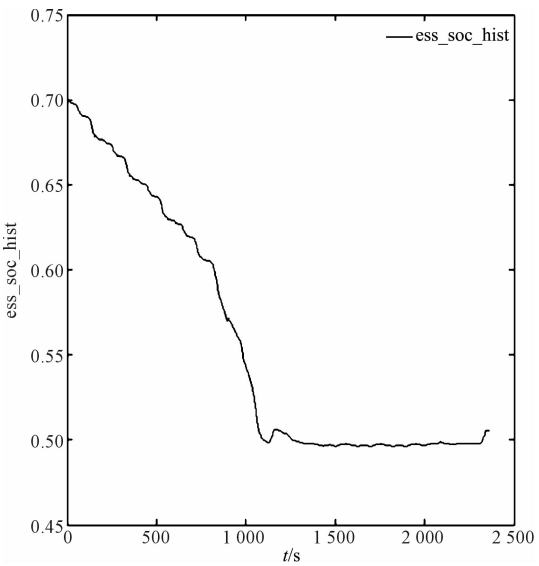
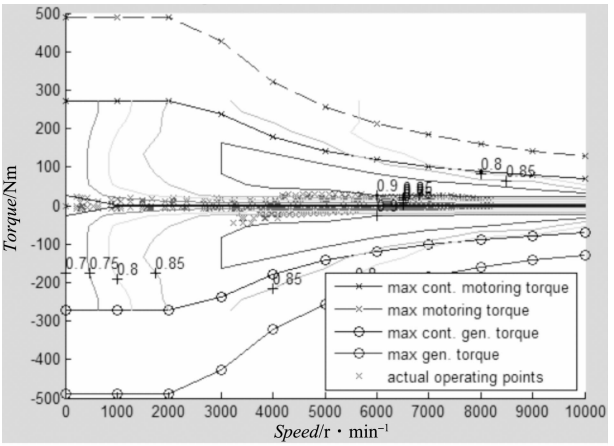


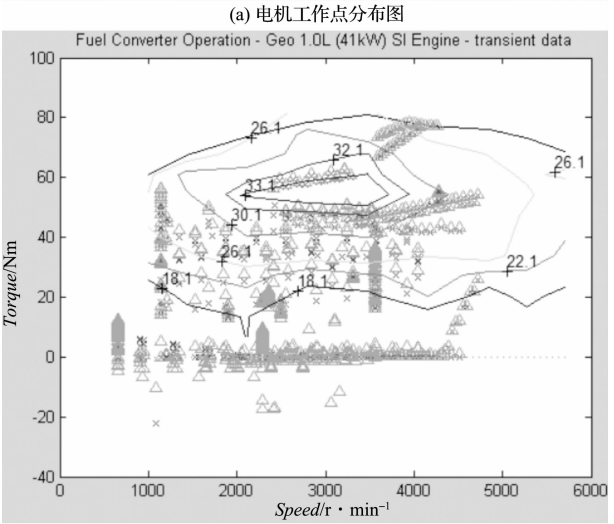
图 5　电池 SOC 随时间变化曲线

电池 SOC 初始值设为 0.7,由图可以看出:当电池电量充足(SOC 较高)时进入电量消耗模式,电池 SOC 一直处于下降状态,整车基本上工作在纯电动模式,只有在需求功率较大时发动机才会开启。因此有效地解决了低速低负荷工况下的发动机排放和经济性差的问题。当电池 SOC 下降到目标值 0.5 时进入电量保持阶段,此时通过让发动机工作在燃油经济性较高的区域给电池充放电从而使 SOC 维持在一个相对稳定状态。

电机和发动机工作点分布图如图 6 所示。



(a) 电机工作点分布图



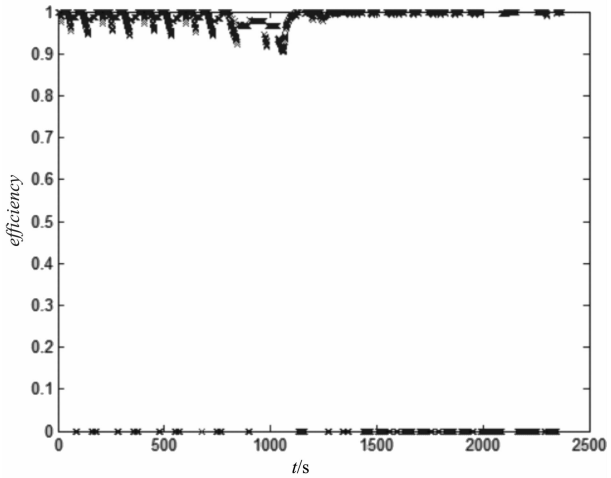
(b) 发动机各档位工作点

图 6　电机和发动机工作点分布图

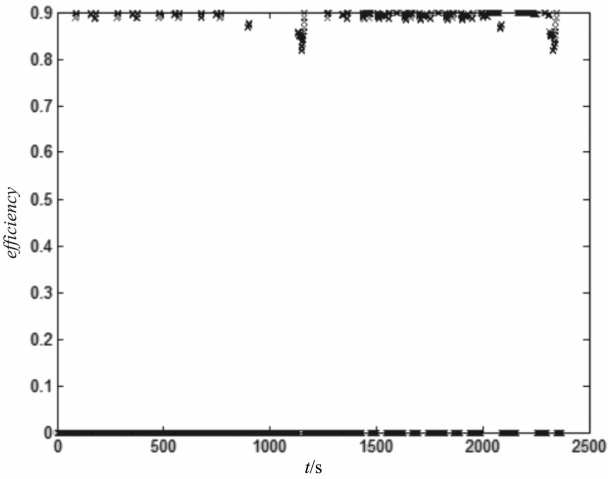
由图可以看出电机工作点大部分在小转矩范围内,与之前设计的控制目标相同,并且电机工作点效率大部分在 0.95 附近。从发动机各挡位工作点分布图可以看出发动机的工作点大部分处于燃油消耗率较低区域,而发动机有一部分工作点在 0 附近是因为在电量消耗阶段车辆工作在纯电动模式,发动机处于关闭状态因此发动机输出转矩为 0。

电池充放电效率分布图如图 7 所示,从图中可知电池的充放电效率都处于较高的水平,从而说明之前设定的 SOC 最大值和最小值都在合理范围,电池充放电内阻较小因此效率较高。

在欧洲城市循环工况下 PHEV 基于规则的控制策略和修改后的预测控制策略油耗和排放结果仿真对比



(a) 电池放电效率



(b) 电池充电效率

图 7 电池充放电效率

如图 8 所示。通过对比发现在同一循环工况下,预测控制策略整车百公里油耗约为 6.5 L,燃油经济性提高了约 7.14%。而在 HC、CO、NO 等排放方面,基于预测信息的控制策略都能降低排放,从而说明所设计的预测控制策略相对于基于规则的控制策略在污染物排放方面都有所提升,降低了对环境的污染。

4 结束语

(1)针对传统汽车进行了动力系统参数的重新设计,从而满足动力性能要求。建立了基于预测信息的控制策略通过判断电池 SOC 和需求功率让整车工作在不同的工作模式,从而合理分配发动机和电机的转矩。

(2)根据欧洲城市循环工况(NEDC),对基于预测信息的控制策略进行了仿真分析,仿真结果表明,通过建立的基于路况信息的预测控制策略可使发动机沿着最佳燃油经济性曲线运行、电动机工作于高效区。进入电量保持阶段能有效地防止电池过度充放电,从而维持在相对稳定的范围内。

Fuel Consumption(L/100km)			7
Gasoline Equivalent			7
Distance(km)			21.9
Emissions(grams/km)			Standards
HC	CO	NOx	PM
0.198	1.112	0.148	0

(a) 基于规则燃油经济性

Fuel Consumption(L/100km)			6.5
Gasoline Equivalent			6.5
Distance(km)			21.9
Emissions(grams/km)			Standards
HC	CO	NOx	PM
0.188	1.043	0.136	0

(b) 预测控制策略燃油经济性

图 8 燃油经济性及排放结果

(3)同基于规则的控制策略仿真结果进行对比可知,在 NEDC 循环工况时、基于预测信息的控制策略能够降低油耗 7.14%,同时 HC、CO 等的排放也大大降低,从而说明建立的预测控制策略是有效的。

参考文献(References):

[1] 王 军,申金升. 国内外混合动力电动汽车开发动态及发展趋势[J]. 公路交通科技,2000,17(1):71-74.

[2] 张 博,郑贺悦,王 成. 可外接充电混合动力汽车能量管理策略[J]. 机械工程学报,2011,47(6):113-120.

[3] 付永恒,张 欣. 基于路况信息的混合动力控制策略的研究[D]. 北京:北京交通大学机械与电子控制工程学院,2011.

[4] 邓丽君,舒 红. 插电式混合动力汽车未来运行工况的预测[D]. 重庆:重庆大学汽车工程学院,2013,17-29.

[5] HAJIMIRI M H, SALMASI F R. A Fuzzy Energy Management Strategy for Series Hybrid Electric Vehicle with Predictive Control and Durability Extension of the Battery[J]. **IEEE Conference on Elecric & Hybrid Vechicles**, 2006(6):1-5.

[6] LARS JOHANNES SON, MATTHIAS ABOARD, BO EGARDT. Assessing the Potential of Predictive Control for Hybrid Vehicle Powertrains Using Stochastic Dynamic Programming[J]. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, 2007, 8(1):71-83.

[7] Qiuming GONG, Yaoyu LI, Zhong-ren PENG. Trip-Based Optimal Power Management of Plug-in Hybrid Electric Vehi-

cles[J]. **IEEE Transactions on Vechicular Technology**, 2008,57(6):3225-3230.

[8] 周　楠,王庆年,曾小华. 基于工况识别的 HEV 自适应能量管理算法[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2009,36(9):37-41.

[9] 罗玉涛,胡红斐,沈继军. 混合动力电动汽车行驶工况分析与识别[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2007,35(6):8-13.

[10] 陈舒燕,朱　靖,余朝刚. 具有能量回馈的纯电动车驱动控制系统[J]. 轻工机械,2015,33(3):54-57.

[11] 曾小华,宫维钧. ADVISOR 2002 电动汽车仿真与再开发应用[M]. 北京:机械工业出版社,2014.

[**编辑**:周昱晨]

本文引用格式:

姜顺明,周　柯. 插电式混合动力汽车预测控制策略的研究[J]. 机电工程,2017,34(1):88 -93.

JIANG Shun-ming, ZHOU Ke. A research on the predictive control strategy of a plug-in hybrid electric car[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017,34(1):88 -93.

《机电工程》杂志:http://www.meem.com.cn

《机电工程》logo标志释义:

1　齿轮造型既寓意机械范畴,同时又如四射的阳光寓意光电范畴,与《机电工程》杂志刊登的内容相契合。

2　小半个齿轮寓意《机电工程》杂志所涉及的内容只是整个大机械领域之中的一小部分,以此来激励本刊的工作人员,不断地为提高期刊水平而努力。

3　《机电工程》的英文缩写由粗体书写,庄重醒目 ,体现了机械的严谨之美。四个英文字母具体表示“ 机电工程杂志 ”,其中:“J”表示 Journal “M”表示 Mechanical、“E”表示 Electrical、“E”表示 Engineering。

4　Logo 整体色彩采用蓝色调,寓意本刊朴实的工作作风。

5　整个《机电工程》logo 标志线条简明,给人以坚定、刚毅之感。