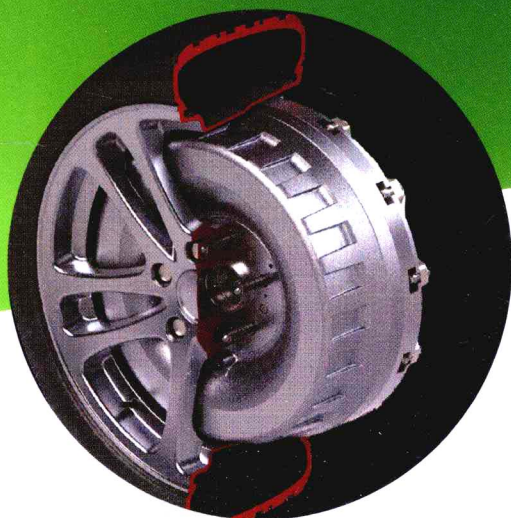


电动机车理论

王贵明 王金懿 陈捷雷 著



科学出版社

电动机车理论

王贵明 王金懿 陈捷雷 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书综合车辆动力学、电机拖动、控制工程、交通管理等相关理论来论述电动机车理论。根据汽车行驶于多变路况和频繁起停的负载特性,分析比较了各类驱动电机的结构原理及其驱动特性,提出通过四轮直驱轮毂电机控制,按路况灵活调配电机功率,以提高运行效率和动能回收率等多项节能技术,既可成倍提高续航里程,也更适于所述的多项电动汽车性能优化,使电动汽车有更好的行驶性能,并在量产后能较大降低制造成本,即以高性价比来确保广大民众均能真正接受,以促进其产业化顺利发展,使电动汽车尽快普及化。本书所涉知识面广,对电动汽车各相关技术进行了全面阐述,基础理论与实用技术结合紧密。本书还提供相应多媒体电子教学课件下载(www.sciencep.com/downloads/),方便教师、学生使用。

本书可供电动汽车相关企业的工程技术人员自学研究,也可供相关企业、行政部门及行业协会等技术领导决策参考,也可作为车辆工程、机电工程、交通工程等相关专业的教学用书。本书所提供的科学分析思考方法,也有利于培养科技人员的创新思维,也十分适合用于汽车制造、电机及其驱动控制等相关企业对科技人员进行专业技术培训或职业教学。

图书在版编目(CIP)数据

电动机车理论/王贵明,王金懿,陈捷雷著. —北京:科学出版社,2015.6

ISBN 978-7-03-044861-3

I. ①电… II. ①王… ②王… ③陈… III. ①电动汽车-理论
IV. ①U469.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第126881号

责任编辑:耿建业 陈构洪 高慧元/责任校对:郭瑞芝

责任印制:徐晓晨/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015年6月第一次印刷 印张:30 1/8

字数:722 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

“衣食住行”是人类生活所必需的，随着社会的进步、经济的发展、交流的广泛等，其中“行”的需求越来越高，而汽车是解决行之需求的有效途径之一。但由于人均资源的匮乏、人们赖以生存的环境受到破坏等问题，特别在我国，其矛盾也越来越突出。为此，节源环保已被定为我国的基本国策，无疑节能环保电动汽车的普及应用将为解决此矛盾起着重要作用。全球多家企业也均在为此而努力，但目前由于其续驶里程及性价比问题还迟迟难以被公众所接受。而电动汽车与传统汽车的本质区别是改变了动力系统，即以燃油为能源的发动机转变为以电能驱动的电机。所以需要充分发挥电机既有驱动、又有发电回馈制动之功能，并利用其更宽的调速范围和极高的动态响应性，结合汽车行驶于多变路况特点，以充分提高电机运行效率和动能回收率，来优化其动力系统。所以人们在努力提高电能储存装置的比功率、比能量的同时，也应在改进电机本身性能和驱动结构上下工夫。鉴于汽车发展 100 多年来业界在改进发动机性能上从未间断过，而在电动汽车进入产业化阶段，也更应加强对电机动力系统的改进研究。而电机驱动技术不仅是任一类电动汽车均需要的，整个工业也均要用它来对电能与机械能进行相互转换，其研究的意义重大。

鉴于前述电动汽车与传统汽车的本质区别，以及电动汽车必将成为节能减排的未来汽车，确实应修改完善电动机车理论，但该项工作需业界共同努力，而本书作者为此开了很好的先例，即要求学术界更多的学者来参与。对王贵明、王金懿两位在近十多年来所作的努力表示欣赏。但仅是理论、计算机仿真或实验室内的研究是不够的，即应尽快实现产业化，而这需得到电机、电子、电控、电池及整车企业的支持，以加快电动汽车的普及与产业化。

发展电动汽车产业要做到如下三好：①好的产品，即性能优良、价格合理；②好的基础设施，即方便和经济，可采用智能充电、慢速充电、快速充电、无线充电、更换电池、储能充电等多种模式；③好的商业模式，这需要各参与方保持一种开放的心态，精诚合作，在利益分配上采取相互妥协的态度，共同将这个产业做大做强，其中主要的是汽车行业与电力行业两大行业要真诚握手并取得妥协，政府要推出有效的政策法规进行指导和促进。发展电动汽车还要做到两结合：①和发展智能电网结合；②和发展信息通信技术结合。目前我们已经看到电动汽车产业化的曙光，希望齐心合作，勇往直前，加速从孕育期发展到普及期和成熟期。

陳清泉

中国工程院院士、英国皇家工程院院士、世界电动车协会创始主席

前 言

无可非议，电动汽车必将成为节能环保的未来汽车。为此，全球各大企业在混合动力及燃料电池方面花费大量人力物力；或为提高蓄电池比能量、比功率投入巨资。尤其近十多年所取得业绩已使各国在为未来电动汽车产业化作努力。但其续航里程及性价比问题还迟迟难以被公众所接受。众所周知，产品性价比提高需要一个良性循环过程：批量化促使改进工艺及生产手段，从而提高性价比再促使更多公众接受以增加批量……但在产业化初期人们常会用“先有蛋还是先有鸡”来纠缠，其实如将新产品喻为鸡，那么蛋就是围绕新产品所需创建的理论。由于一种产品可采用多种方式、工作原理及其结构，但经实践应用后最终必会趋于某种最佳方式或结构，需要通过建立正确完备的理论来探索出最佳结构就能少走弯路，以尽早孵育出高性价比产品，而所走弯路不仅要浪费大量人力物力，更关键的是还将延误赶超技术领先的时机。

汽车业经 100 多年发展虽建立了完备的汽车理论，但结合发动机万有特性论述的汽车动力性及传动系结构设计等部分理论不适于最终由电机驱动的车辆。且传统汽车以汽油为能源载体，经发动机转换为机械能的基本特性，已被改变为由电机进行电能与机械能的互为转换，即通过电—磁之媒介使电机既能产生驱动力，又可发电回馈或电磁制动（两者相结合的制动既能将动能转换为电能以增长续航里程，又类似防抱死制动过程可提高安全性），并且调速范围和动态响应等性能远高于发动机，要充分发挥电机优势，即需根据电机拖动理论，结合车辆动力学、自动控制等相关理论来对电动汽车结构进行突破性改进，为此需建立相应理论，根据不破而永不立的惯例，在此暂且提出改名为“电动机车理论”，但为尊重习惯仍用电动汽车来表述。也有待在今后长期制造与应用的实践中来验证和完善，本书姑且仅为此作一抛砖引玉。

按汽车行驶阻力与其驱动力平衡分析可知，汽车在大部分路况以轻载低速平路匀速行驶时的较低阻力，与在重载、高速、上坡、加速时的较高阻力相比，所需驱动力会相差许多倍，为满足汽车行驶工况各项指标，对现有电动汽车均为单台驱动电机的额定功率只能按最高指标来配置。但所有电机均在所设计的额定功率及其转速附近运行时效率较高，而远离额定功率时效率必降低，特别是在低负荷、低转速时效率会很低，即要求能按工况来灵活配置电机额定功率。且汽车在多变路况中又有较大比例的制动能量可回收，但只有驱动轮才能实现动能回收。为此，采用四驱轮毂电机就能满足上述特定要求，如汽车在大部分市区以低速为主时仅由额定功率较小的前两轮电机驱动，而在中高速为辅或加速、上坡时再按需启用额定功率较大的后两轮或四轮毂电机驱动，在降速制动和下坡滑行时采用四轮毂电机来发电回馈以成倍提高动能回收。如此按路况灵活调配电机以提高运行效率和动能回收率，可在大部分行驶工况由相同的蓄电池容量来增加续航里程一倍多，也直接节省电网所需充入的更多电能，其节能减排意义远高于使蓄电池比能量和比功率增加一倍。进而通过对汽车动力性及操纵稳定性等理论的综合分析，又探索到电动汽车更进一步节能的技术措施，亟待于产业化进程中经协作实施应用。

根据控制理论要求,系统所包含的检测、控制、执行三大机构的动态响应必须匹配协调控制,其中传感器和控制器的动态响应随电子技术发展均已极高,即执行机构的响应速度制约了整个系统性能的提高,而采用电机作为执行机构要远比机械或液压等机构响应快,尤其发动机调速响应要比电机差数百倍。按汽车行驶所需有驱动、制动、转向三大执行机构,且都是通过轮胎与地面的相对作用而产生其相应运动力。而通过充分发挥直驱力矩电机的结构优势及其宽广的调速范围,即可实现动态响应更快的直驱轮毂电机。并利用所提的兼有驱动、发电回馈、电磁制动多功能轮毂电机;采用直线电机助力转向及电子差速控制四轮转向等技术,即可全面改善汽车所有的三大执行机构性能。如此采用四驱轮毂电机通过实测路况反馈,利用其快速响应性即可及时对前、后、左、右各车轮的驱动力、制动力、转向力按所述理论进行适宜调整,以此可极大提高汽车行驶的操控性、安全性、稳定性及能源利用率,实现传统汽车难以达到的高效控制。通过分析各类电机的结构原理,选择转速与转矩的负载特性更适于车辆行驶于多变路况、重载起步及频繁启停等要求,又使量产后能较大降低成本的电机类型,再经改进设计电机结构使更适于轮毂内直接驱动,从而获得最佳动力驱动方式。

为此,本书第一章对电动汽车作了全面的概况介绍;第二章对用于电动汽车驱动的各类电机进行分析说明,重点分析如何优化电机驱动结构提高其性能(介绍了经近万次计算机仿真分析,解决SR电机转矩脉动大的历史性难题,优化电机结构及控制策略,以更适于直驱轮毂电机的多项专利技术);第三、五~八章参考现有汽车理论,结合电机驱动特点及控制理论,分别阐述了汽车动力性、操纵稳定性、平顺舒适性、行驶通过性和制动安全性相关理论,论述中也结合四轮直驱动态响应快等优势,对如何提高汽车相应性能进行了分析说明;第四章在第二、三章基础上,介绍了电动汽车动力系统参数设计及其实例,按其实例计算设计即可得到远高于现有电动汽车性价比的实施方案;第九章利用电机驱动优势结合所述的电动汽车理论,介绍了电动汽车多项性能优化技术;由于交通拥堵极大阻碍了汽车的有效应用和可销率;第十章通过对交通管理理论进行分析,提出了改善交通须节约交通资源的相关理论,以及节源环保综合治理城市交通的一系列具体措施。为巩固所学重点知识,每章后还附有相应复习思考题及其答案参考页码,结合常用符号表将便于掌握全书的重点理论。

因此,本书的要旨是充分发挥电机各项优势,以节能提高续航里程,以优化结构提高性价比,通过性能优化提高汽车操控稳定安全性,以消除或极力减小汽车所带来的交通事故、能源危机、环境污染和道路拥堵四大负面效应,也实现曾提出的“人人有车坐、家家有车开、天蓝空气好、交通又畅通”之梦,相信这也是全人类之梦。借助于本书的出版,使我们十多年来所研究的综合性解决技术能得以推广应用,使汽车还给人类真正的福祉,以圆人生价值之梦。

万分感谢中国工程院院士、英国皇家工程院院士、世界电动车协会创始主席、亚洲电动车之父陈清泉院士为本书作序。这是给我们工作莫大的支持和鼓励。

作者利用从事30余年数控伺服驱动控制的经历,将其与电动汽车的电机驱动控制相结合,通过近十多年对电动汽车及其多门相关学科理论的深入研究,并与近几年先后在北京、杭州有关电机、汽车企业工作的实践相结合,书中提出多项电动汽车的节能及其性能优化的创新技术,以提高电动汽车性价比来促使其普及产业化。在此也对所工作过的企业

及给予相应帮助的人士表示深切感谢。也亟待在产业化进程中被更多相关企业采纳，在研制实践中予以提高促使普及实用化。同时诚挚希望业界同仁对所述技术及其理论多提宝贵意见，也期盼着随时可通过邮箱（wangguiming@zjut.edu.cn; jacksonkingwang@qq.com）进行交流、讨论，共同为完善电动机车理论及其普及产业化作出贡献，如对书中相关技术有进一步问题也欢迎通过联系，以给予可能的分析。对本书所参阅和引用的大量国内外有关技术资料、著作与文献，在此一并谨致谢意。

限于作者水平，书中难免存在不妥之处，恳请广大读者批评指正。

作 者

2015 年元月

于杭州

常用符号表

第二章 电动汽车驱动电机及其调速控制系统

物 理 量	符号及相关公式	单 位	物 理 量	符号及相关公式	单 位
最高转速	$n_{\max}$	r/min	最低转速	$n_{\min}$	r/min
调速范围	$D=n_{\max}/n_{\min}$		基速(额定转速)	$n_{\text{base}}(n_e)$	r/min
转速因子	$x=n_{\max}/n_{\text{base}}$		负载功率	P_L	W
负载转矩	$T_L=P_L/\omega=9.55P_L/n$	N·m	电机角速度	ω	rad/s
直流电机的电磁转矩	$T=C_T\Phi I_a$	N·m	转矩常数	C_T	
电枢电流	I_a	A	每极磁通	Φ	Wb
交流电机的同步转速	$n_0=60f/P$	r/min	电流频率	f	Hz
交流电机极对数	P		转差率	s	
交流电机的转速	$n=\frac{60f}{p}(1-s)$	r/min	SR 电机的电磁转矩	$T_{em}=\frac{1}{2}\frac{\partial L(\theta)}{\partial \theta}i^2$	N·m
绕组电感	L	亨利(H)	转子位置角	θ	(°)
绕组电流 i	i	A			

第三章 基于纵向力学的动力性

物 理 量	符号及相关公式	单 位	物 理 量	符号及相关公式	单 位
汽车质量	m	kg	汽车重力	$G=mg$	N
滚动阻力系数	f		滚动阻力	$F_f=Gf\cos\alpha\approx Gf=mgf$	N
空气阻力系数	C_D		空气阻力	$F_w=C_D A u_a^2/21.15$	N
坡度角、坡度	α 、 $i=h/s=\tan\alpha$	(°)、%	坡度阻力	$F_i=G\sin\alpha\approx Gi$	N
道路阻力系数	$\psi=f+i$		道路阻力	$F_\psi=F_f+F_i\approx G\psi$	N
加速度	du/dt	m/s ²	加速阻力	$F_j=\delta m du/dt$	N
旋转质量换算系数	δ , 式(3-31)、 式(3-34)、式(3-36)		车轮驱动力矩	$T_i=T_q i_g i_0 \eta_T$	N·m
车轮半径	r	m	车轮驱动力	$F_i=T_i/r=F_f+F_w+F_i+F_j$	N
变速器、主减速器传动比	i_g 、 i_0		汽车速度	$u=u_a/3.6$	m/s
动力系统输出转速	n	r/min		$u_a=0.377rn/i_g i_0$	km/h
动力系统输出转矩	T_q	N·m	传动效率	$\eta_T=(P_e-P_r)/P_e$	
动力系统输出功率	$P_e=T_q n/9550$	kW	传动系损失功率	P_r	kW
动力因数	$D=(F_t-F_w)/G$		附着系数	φ	
附着率	$C_{\varphi}=F_{Xi}/F_{Zi}$		附着力	$F_\varphi=F_Z\varphi$	N
地面法向反作用力	F_Z , 式(3-41)	N	地面切向反作用力	$F_X=F_i$	N

第五章 基于侧向力学的操纵稳定性

物 理 量	符号及相关公式	单 位	物 理 量	符号及相关公式	单 位
地面侧向反作用力	$F_Y = F_{Ya} + F_{Y\gamma} = k\alpha + k_\gamma\gamma$	N	侧偏角	α	rad 或 ($^\circ$)
侧向力	$F_y = -F_Y$	N	侧偏刚度	k	N/rad 或 N/ $^\circ$)
侧偏力	$F_{Ya} = k\alpha$	N	外倾角	γ	rad 或 ($^\circ$)
外倾侧向力	$F_{Y\gamma} = k_\gamma \gamma^+$	N	外倾刚度	k_γ	N/rad 或 N/ $^\circ$)
回正力矩	T_Z	N · m	侧向加速度	$\alpha_y = R\omega_r^2 = u\omega_r$	m/s ² 或 g
质心侧向速度	v	m/s	横摆角速度	$\omega_r = u/R$	rad/s 或 ($^\circ$)/s
质心至前轴的距离	a	m	轮距	B	m
质心至后轴的距离	b	m	轴距	$L = a + b$	m
稳态横摆角速度增益	$\left(\frac{\omega_r}{\delta}\right)_s = \frac{\frac{u}{L}}{1 + Ku^2}$	1/s	稳定性因数	$K = \frac{m}{L^2} \left(\frac{a}{k_2} - \frac{b}{k_1} \right)$	s ² /m ²
前、后轮侧偏角绝对差值	$(\alpha_1 - \alpha_2) = \alpha_y L K$		转向盘转角	δ_{sw}	rad 或 ($^\circ$)
转向半径	$R = \frac{L}{\delta - (\alpha_1 - \alpha_2)}$	m	前轮转角	$\delta = \frac{L}{R} + (\alpha_1 - \alpha_2)$	rad 或 ($^\circ$)
静态储备系数	$S. M. = \frac{k_2}{k_1 + k_2} - \frac{a}{L}$		特征车速	$u_{ch} = \sqrt{1/K}$	m/s
			临界车速	$u_{cr} = \sqrt{-1/K}$	m/s
固有圆频率	ω_0 , 式(5-34)	rad 或 ($^\circ$)	阻尼比	ζ , 式(5-35)	
峰值反应时间	ϵ , 式(5-37)	s	反应时间	τ , 式(5-36)	s
弹簧刚度	k_s	N/m	悬挂质量	m_s	kg
汽车绕 OZ 轴的转动惯量	I_z	kg · m ²	非悬挂质量	m_u	kg
侧倾力矩	M_{Φ_r}	N · m	车厢侧倾角	$\Phi_r = \frac{M_{\Phi_r}}{\sum K_{\Phi_r}}$	rad 或 ($^\circ$)
悬架侧倾角刚度	K_{Φ_r}	N · m/rad			
侧向力变形转向系数	$\frac{\partial \delta}{\partial F_y}$	($^\circ$)/kN	侧倾外倾系数	$\frac{\partial \gamma}{\partial \Phi_r}$	($^\circ$)/($^\circ$)
回正力矩变形转向系数	$\frac{\partial \delta}{\partial T}$	($^\circ$)/ (100N · m)	侧倾转向系数	$\frac{\partial \delta}{\partial \Phi_r}$	($^\circ$)/($^\circ$)
侧向力变形外倾系数	$\frac{\partial \gamma}{\partial F_y}$	($^\circ$)/kN			

第六章 基于垂向力学的平顺性

物 理 量	符号及相关公式	单 位	物 理 量	符号及相关公式	单 位
路面不平度函数	$q(I)$	m	空间频率	n	m ⁻¹
路面功率谱密度	$G_q(n)$, 式(6-6)	m ³	参考空间频率	$n_0 = 0.1$	m ⁻¹
路面不平度系数	$G_q(n_0)$	m ³	频率指数	W	
悬挂质量分配系数	$\epsilon = \rho_y^2/(ab)$		时间频率	$f = un = \omega/(2\pi)$	Hz 或 s ⁻¹

续表

物 理 量	符号及相关公式	单 位	物 理 量	符号及相关公式	单 位
绕横轴 y 的回转半径	ρ_y	m	车速	u	m/s
车身部分固有圆频率	$\omega_0 = \sqrt{K/m_2}$	rad/s	激振频率	ω	rad/s
轮胎部分固有圆频率	$\omega_t = \sqrt{(K+K_t)/m_1}$	rad/s	频率比	$\lambda = \omega/\omega_0$	
有阻尼固有圆频率	$\omega_r = \omega_0 \sqrt{1-\zeta^2}$	rad/s	悬架刚度	K	N/m
悬架系统阻尼比	$\zeta = C/(2\sqrt{m_2 K})$		轮胎刚度	K_t	N/m
车轮部分阻尼比	$\zeta_t = C/(2\sqrt{(K+K_t)m_1})$		阻尼系数	C	N·s/m
车身质量(悬挂质量)	m_2	kg	刚度比	$\gamma = K_t/K$	
车轮质量(非悬挂质量)	m_1	kg	质量比	$\mu = m_2/m_1$	
车轮部分垂直位移	z_1	m	车身加速度	$\ddot{z}$	m/s ²
座垫上人体的位移	p	m	车身垂直位移	z_2	m
车轮与路面间的动载	$F_d = m_2 \ddot{z}$	N	车轮部分的动载	$F_{d1} = m_1 \ddot{z}_1$	N
双轴汽车前、后端 车身振动主频率	$\Omega_{1,2}$, 式(6-79)	rad/s	悬架挠度	$f_d = z - q$	m
双轴汽车垂直和 角振动主频率	$\Omega_{z,\varphi}$, 式(6-85)	rad/s	前轴上的质量	m_{2f}	kg
			后轴上的质量	m_{2r}	kg
			质心 C 上的质量	m_{2c}	kg

第七章 基于地面力学的通过性

物 理 量	符号及相关公式	单 位	物 理 量	符号及相关公式	单 位
汽车的挂钩牵引力	$F_d = F_X - F_r$	N	牵引系数	$TC = F_d/G$	
驱动轮输入转矩	T_w	N·m	牵引效率	$TE = F_d r(1-s_r)/T_w$	
驱动轮动力半径	r	m	滑转率	s_r , 式(7-22)	
汽车重力或垂直载荷	G 或 W	N	土壤推力	$F_X = A c + W \tan \varphi$	N
土壤的黏聚性系数	c	kPa	土壤的摩擦角	φ	(°)
驱动轮胎的接地面积	A	m ²	土壤的切应力	τ , 式(7-8)、式(7-9)	kPa
土壤剪切变形模数	K	m	土壤剪切变形	j	m
剪切面法向压力	$\sigma = W/A$	kPa	剪切强度	$\tau_{\max} = c + \sigma \tan \varphi$	kPa
土壤的黏聚变形模数	k_c	kN/m ⁿ⁺¹	土壤沉陷量	z	m
土壤的摩擦变形模数	k_φ	kN/m ⁿ⁺²	沉陷指数	n	
承载面积的短边长	b	m	单位面积压力	$P = (k_c/b + k_\varphi) z^n$	kPa
土壤的压实阻力	F_{rc}	N	推土阻力	F_{rb}	N
轮胎的弹滞损耗阻力	F_{rt}	N	土壤阻力	$F_r = F_{rc} + F_{rb} + F_{rt}$	N
车辆的实际速度	u_a	m/s	驱动轮角速度	ω	rad/s
驱动轮相对地面滑动速度	$u_s = s_r u_t = r\omega - u_a$	m/s	车辆理论速度	$u_t = r\omega$	m/s
轮胎刚度产生的压力	p_c	kPa	轮胎充气压力	p_i	kPa
土壤承载能力系数	N_c 、 N_r		单位负荷弹滞 损耗阻力	$f_t = F_{rt}/W$	
土壤单位体积质量重力	γ_s	N/m ³			

第八章 汽车的制动安全性

物 理 量	符号及相关公式	单 位	物 理 量	符号及相关公式	单 位
地面制动力	$F_{xb} \leq F_{\varphi} = F_Z \varphi$	N	车轮半径	r	m
制动器制动力	F_{μ}	N	制动力矩	$T_{\mu} = F_{\mu} r \approx F_{xb} r$	N · m
附着系数	φ		附着力	$F_{\varphi} = F_Z \varphi$	N
制动力系数	$\varphi_b = F_{xb} / F_Z$		垂直载荷	F_Z	N
侧向力系数	$\varphi_l = F_y / F_Z$		滑动率	s , 式(8-5)	
峰值附着系数	φ_P		侧向力	F_y	N
滑动附着系数	φ_S		制动减速度	$a_b = du/dt$	m/s ²
最大地面制动力	$F_{xb \max} = F_{\varphi} = F_Z \varphi$	N	制动强度	$z = g du/dt = \varphi$	
制动器制动力分配系数	$\beta = F_{\mu 1} / (F_{\mu 1} + F_{\mu 2})$		同步附着系数	φ_0 , 式(8-13)	

目 录

序

前言

常用符号表

第一章 概述..... 1

第一节 电动汽车概况..... 1

一、电动汽车发展简介..... 1

二、电动汽车的类型、结构与特点..... 3

第二节 电动汽车的基本组成与特点

..... 15

一、电动汽车的车体总成..... 15

二、动力储能装置简介..... 19

三、动力驱动系统结构与特点..... 39

四、电动汽车的整车控制系统..... 46

第三节 电动汽车产业化所涉及问题

..... 47

一、电动汽车涉及的基础理论..... 48

二、电动汽车产业链特点..... 50

三、电动汽车创新商业模式..... 54

复习思考题..... 57

第二章 电动汽车驱动电机及其调速控制

系统..... 59

第一节 概述..... 59

一、电机调速性能与其发展借鉴..... 59

二、汽车行驶对驱动电机的要求..... 62

三、电机驱动系统的基本组成..... 65

第二节 直流电机..... 66

一、直流电机的基本原理..... 66

二、直流电机的基本结构..... 68

三、直流电机的励磁方式..... 69

四、他励直流电机的调速与制动..... 71

五、他励直流电机的驱动控制..... 76

六、直驱力矩电机特性及其结构形状..... 78

第三节 交流电机..... 81

一、交流电机的工作原理..... 81

二、异步电机的结构及铭牌数据..... 83

三、异步电机启动特性的改进..... 85

四、交流电机的矢量控制技术..... 87

五、交流变频调速驱动控制..... 90

第四节 永磁无刷电机..... 92

一、永磁电机的分类..... 92

二、磁性转子结构与材料特性..... 93

三、永磁无刷直流电机..... 96

四、永磁交流同步电机..... 104

第五节 开关磁阻电机及驱动 SRD

系统..... 106

一、变磁阻电机的运行特点与种类..... 106

二、SRD 系统的组成与结构原理..... 107

三、SR 电机的基本方程与性能分析..... 112

四、SR 电机的磁路结构设计..... 119

五、SR 电机的驱动控制..... 127

六、双凸极永磁电动机..... 135

七、增强发电回馈、电磁制动的多功能

SR 轮毂电机..... 139

八、具有启动绕组的单相多功能 SR 轮

毂电机..... 143

九、轴向分相具有轴向、径向三维混合磁

路的多功能高效 SR 电机..... 145

十、使低、高速均能高效运行的方法及其

SR 电机..... 149

十一、明显改善转矩脉动的 SR 电机

..... 153

第六节 直接驱动轮毂式装置..... 159

一、轮毂电机的发展与其结构类型..... 159

二、直接驱动轮毂式装置的特征..... 161

复习思考题..... 165

第三章 基于纵向力学的动力性..... 168

第一节 电动汽车动力系统的评价指标

..... 168

第二节 汽车的行驶阻力·····	170	曲线·····	235
一、滚动阻力·····	170	三、侧偏特性的影响因素·····	237
二、空气阻力·····	176	四、回正力矩·····	239
三、坡度阻力·····	179	五、有外倾角时轮胎的滚动·····	240
四、加速阻力·····	180	第三节 线性二自由度汽车模型对前	
第三节 汽车的驱动力-行驶阻力平衡		轮角输入的响应·····	242
·····	181	一、线性二自由度汽车模型的运动微分	
一、汽车的驱动力·····	181	方程·····	242
二、汽车行驶方程式·····	189	二、前轮角阶跃输入的稳态响应·····	245
三、各类驱动装置的转速特性比较·····	193	三、前轮角阶跃输入的瞬态响应·····	249
第四节 汽车行驶的附着条件与汽车		四、横摆角速度频率响应特性·····	254
的附着率·····	201	第四节 汽车操纵稳定性与悬架的	
一、汽车行驶的附着条件·····	201	关系·····	256
二、汽车附着力与地面法向反作用力		一、汽车的车厢侧倾·····	256
·····	202	二、侧倾时垂直载荷在左右车轮上的重	
三、驱动轮上的地面切向反作用力·····	206	新分配及对稳态响应的影响·····	263
四、附着率及其影响因素·····	207	三、车厢侧倾时车轮外倾角的变化·····	265
复习思考题·····	213	四、侧倾转向·····	267
第四章 电动汽车动力系统的设计·····	215	五、变形转向·····	267
第一节 电动汽车动力系统参数的设		六、变形外倾·····	269
计基础·····	215	第五节 操纵稳定性与转向系的关系	
一、电机各项参数及传动系的确定·····	215	·····	269
二、动力储能装置参数的确定·····	217	一、转向系的功能与转向盘力特性·····	269
第二节 纯电动公交客车的动力系统		二、不同工况下的操纵稳定性要求·····	271
设计实例·····	220	三、高速行驶时的操纵稳定性试验·····	272
第三节 电动轿车采用四轮直驱轮毂		第六节 操纵稳定性与切向力的关系	
电机的设计实例·····	223	·····	273
复习思考题·····	229	一、地面切向反作用力与转向特性·····	273
第五章 基于侧向力学的操纵稳定性		二、由切向反作用力控制转向特性·····	274
·····	230	第七节 提高操纵稳定性的各类电子	
第一节 概述·····	230	控制系统综合比较·····	278
一、操纵稳定性包含的内容·····	230	第八节 汽车的侧翻·····	279
二、车辆坐标系·····	231	一、刚性汽车的准静态侧翻·····	279
三、转向盘角阶跃输入的时域响应·····	232	二、带悬架汽车的准静态侧翻·····	281
四、操纵稳定性的研究方法·····	233	三、汽车的瞬态侧翻·····	281
五、操纵稳定性的试验评价方法·····	234	第九节 汽车操纵稳定性的路上试验	
第二节 轮胎的侧偏特性·····	234	·····	283
一、轮胎的坐标系·····	234	一、低速行驶转向轻便性试验·····	283
二、轮胎的侧偏现象和侧偏力-侧偏角		二、稳态转向特性试验·····	283

三、瞬态横摆响应试验	284		323
四、汽车回正能力试验	285	一、“人体-座椅”系统的传递特性	323
五、转向盘角脉冲试验	285	二、“人体-座椅”系统的参数选择	325
复习思考题	285	第七节 汽车平顺性试验和数据处理	325
第六章 基于垂向力学的平顺性	287		325
第一节 人体对振动的反应和平顺性 的评价	287	一、平顺性试验的主要内容	325
一、人体对振动的反应	287	二、平顺性试验数据的采集和处理	326
二、平顺性的评价方法	289	复习思考题	327
第二节 路面不平度的统计特性	291	第七章 基于地面力学的通过性	329
一、路面不平度的功率谱密度	291	第一节 汽车通过性评价指标及几何 参数	329
二、空间、时间频率功率谱密度	292	一、汽车支承通过性评价指标	329
三、路面对四轮输入的功率谱密度	294	二、汽车通过性几何参数	329
第三节 简化为单质量振动系统分析	296	第二节 松软地面的物理性质	331
一、汽车振动系统的简化	296	第三节 车辆的挂钩牵引力	333
二、单质量系统的自由振动	297	一、车辆在松软地面上的土壤阻力	333
三、单质量系统的频率响应特性	299	二、松软地面给车辆的土壤推力	337
四、单质量系统对随机输入的响应	300	三、挂钩牵引力	338
第四节 车身、车轮双质量系统的振 动	305	第四节 汽车通过性计算和影响因素	339
一、运动方程和振型分析	305	一、牵引通过性计算	339
二、双质量系统的传递特性	308	二、影响汽车通过性的因素	340
三、车身加速度、车轮相对动载和悬架 弹簧动挠度的幅频特性	310	第五节 间隙失效的障碍条件	341
四、计算系统振动响应量均方根值	312	第六节 汽车越过台阶、壕沟的能力	342
五、系统参数对振动响应量均方根值的 影响	313	第七节 汽车的通过性试验	344
第五节 双轴汽车的振动	317	复习思考题	345
一、振型分析	317	第八章 汽车的制动安全性	347
二、减小车身俯仰角加速度的分析	319	第一节 制动性的评价指标	347
三、前、后轮双输入系统等效为单轮输 入的折算幅频特性	319	第二节 制动时车轮的受力	348
四、轴距中心处 z_c 和 φ 对 z_{2f} 的幅频特性	320	一、地面制动力 F_{xb}	348
五、车身上任一点 P 的垂直位移对前轴 上方车身位移的幅频特性	322	二、制动器制动力 F_μ	348
六、功率谱密度和均方根值的计算	322	三、 F_{xb} 、 F_μ 与附着力之间的关系	348
第六节 “人体-座椅”系统的振动		四、硬路面上的附着系数	349
		第三节 汽车的制动效能及其恒定性	351
		一、制动距离及制动减速度	351
		二、制动距离的分析	352
		三、制动效能的恒定性	354

第四节 制动时汽车的方向稳定性	355	三、四轮转向系统	402
一、汽车的制动跑偏	355	四、电子差速转向的工作原理	405
二、后轴侧滑与前轴失去转向能力	356	五、转向系统的全面改进	408
第五节 前、后轮制动力的比例关系	357	第六节 安全测距防撞控制系统	411
一、地面对前后轮的法向反作用力	357	一、安全测距防撞控制的实施意义	411
二、理想的前后轮制动力分配曲线	358	二、防撞测距传感技术	412
三、具有固定比值的前、后制动器制动力与同步附着系数	359	三、测距防撞控制系统的结构原理	416
四、前后制动力为固定比值的汽车在各种路面上制动过程的分析	360	第七节 电子控制悬架系统 ECSS	418
五、利用附着系数与制动效率	363	一、ECSS 的功能和可控悬架分类	418
六、前、后制动器制动力分配要求	365	二、半主动式电子控制悬架系统	419
第六节 汽车的制动性试验	367	三、全主动式电子控制悬架系统	420
复习思考题	369	第八节 汽车电子巡航控制系统 CCS	424
第九章 电动汽车的性能优化	371	一、汽车 CCS 的功用和基本原理	424
第一节 概述	371	二、汽车 CCS 组成部件的功能原理	425
一、交通现状赋予汽车业的使命	371	三、汽车 CCS 的未来发展	427
二、各种辅助安全性能装置简述	372	复习思考题	429
三、优化电动汽车的结构布局	374	第十章 汽车业发展与治理交通之重要性	431
第二节 防抱死制动系统 ABS	377	第一节 智能交通与城市交通管理的理论基础	432
一、ABS 的基本功能与发展	377	一、智能交通系统简介	432
二、ABS 的基本组成与分类	378	二、道路交通流理论的简要分析	434
三、ABS 的工作原理	380	三、道路通行能力分析	438
四、ABS 的基本结构	382	四、交通需求管理	443
第三节 驱动防滑转控制 ASR	387	第二节 改进公交设施与服务水平	445
一、ASR 的功用及与 ABS 的区别	387	一、改进公交服务设施的八项措施	445
二、ASR 的基本组成与分类	388	二、公交线路最佳布局软件简介	447
三、ASR 的工作原理	390	三、提高出租车载客率的措施	448
四、ASR 的基本结构	390	第三节 可节约交通资源一倍的电动微轿车	449
第四节 汽车电子稳定系统 ESP	393	一、从提高交通资源利用率考虑车型	449
一、ESP 的基本功能	393	二、电动微轿车的技术改进	451
二、ESP 的结构组成	394	三、推出电动微轿车的综合效益	453
三、ESP 的工作原理	394	第四节 解决城市交通拥堵的措施	455
第五节 新型转向系统及电子差速控制	396		
一、汽车转向系统概述	396		
二、电子控制电动助力转向系统	398		

一、改善城市交叉路口的措施	455	复习思考题.....	460
二、解决机动车与非机动车混行和机动		主要参考文献.....	461
车停车难的问题	457	后记.....	462
三、发挥交通管理部门的作用	458		

第一章 概 述

第一节 电动汽车概况

一、电动汽车发展简介

(一) 电动汽车的早期发展

尽管电动汽车技术目前看来还处于新兴发展期，但它的产生却早于燃油车，并已经历了多个兴衰周期。电动汽车的最早构想和研制历史可追溯到 1834 年，Thomas Davenport 创造了一辆电动三轮车，它由一组不可充电的干电池驱动，只能行驶一小段距离。而开发以可充电池为动力的电动汽车是法国人和英国人。1881 年，法国工程师古斯塔夫·特鲁夫（Gustave Trouve）发明了第一辆以铅酸电池为动力的电动三轮汽车，并于 1881 年 8 月在法国巴黎举办的国际电器展览会上展出。英国人阿顿（Arden）与培里（Perry）在 1882 年研发了三轮电动汽车。这些均早于德国人卡尔·奔驰（Karl Benz）于 1885 年研制成功的世界上第一辆以汽油为燃料的汽车。

电动汽车在欧洲发明后，很快传到美国。1890 年，美国第一辆蓄电池汽车在衣阿华州诞生，车速为 23km/h。在此之后的十多年里，电动汽车在美国得到快速发展。到 20 世纪初，美国以蓄电池为动能的电动汽车已占汽车保有量的 38%，仅次于占汽车保有量 40% 的蒸汽机汽车，而内燃机汽车当时仅为 22%。即燃油车保有量仅占更为笨重的蒸汽机车的一半左右，追其原因，我们在第三章（图 3-26 相关分析）通过对各类驱动装置的转速特性比较分析中也许能得到启发：活塞式蒸汽机的转速负载特性远比活塞式内燃机更适合于汽车多变路况的要求。由此也说明改善电动汽车驱动电机的转速负载特性对优化汽车性能的重要性。

随着石油的大量开采、油品油质的提高以及内燃机技术的发展，特别是发动机启动器在汽车上的应用，以及大规模流水线生产（福特汽车公司于 1913 年开发了世界上第一条汽车装配流水线，使当时的 T 型车组装时间从 12.5h 缩短到 1.5h，后来达到 10s 出一辆），使燃油车的性价比优势逐渐明显。电动汽车由于续驶里程短等因素，其发展优势开始走向衰退，加之投入不足，使其研究与开发工作一度停滞，技术发展曾经长期处于缓慢发展之中。

到 20 世纪 60 年代后，由于能源、环境问题使人们对电动汽车又开始重新重视，世界各国政府与汽车制造商对电动汽车的研究开发均有不同程度的投入。特别是在近十多年来，电动汽车研究开发热已进入了高峰期，并在各项技术发展上取得相应成果和进步。

(二) 电动汽车在各国的发展现状及规划

近十几年来，全球各国汽车制造商均在加紧研制各类电动汽车，并在各方面取得相应进展和突破。特别是近几年为推动新能源汽车普及，世界主要的汽车工业国家已在新能源