

★ ★ ★
★ “十三五” ★

国家重点出版物出版规划项目



国之重器出版工程
制造强国建设

新能源汽车关键技术研究丛书

Distributed Parameter Model of
Electric Motors for
Vehicular Application

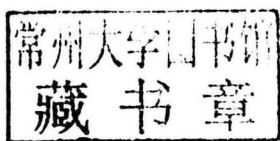
车用驱动电机分布参数
建模方法及其应用

钟再敏 江尚 著

新能源汽车关键技术研究丛书

车用驱动电机分布参数 建模方法及其应用

钟再敏 江 尚 著



 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

针对车用电机设计中普遍存在的磁场谐波和饱和非线性问题, 本书给出了所谓的“分布参数建模”方法。该方法选取转子同步坐标系下的电流幅值和相位、转子空间电角度等为广义坐标, 将有限元分析得到的磁共能进行重构, 进而推导出磁链、转矩和电压方程。与常见的基于电感的“集中参数模型”相比, “分布参数模型”的建立与参数提取同步完成, 且能本征地描述磁场的谐波和饱和现象。本书内容可作为基于精确模型的车用电机控制、诊断相关工作的理论基础。

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

车用驱动电机分布参数建模方法及其应用 / 钟再敏, 江尚著. —北京: 北京理工大学出版社, 2018.4

(新能源汽车关键技术研究丛书)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目 国之重器出版工程

ISBN 978-7-5682-5486-1

I. ①车… II. ①钟… ②江… III. ①新能源-汽车-电机-分布参数-建模系统 IV. ①U469.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 060906 号

出 版 / 北京理工大学出版社有限责任公司
社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号
邮 编 / 100081
电 话 / (010) 68914775 (总编室)
(010) 82562903 (教材售后服务热线)
(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>
经 销 / 全国各地新华书店
印 刷 / 固安县铭成印刷有限公司
开 本 / 710 毫米×1000 毫米 1/16
印 张 / 17.5

彩 插 / 1
字 数 / 302 千字
版 次 / 2018 年 4 月第 1 版 2018 年 4 月第 1 次印刷
定 价 / 66.00 元

责任编辑 / 杜春英
文案编辑 / 杜春英
责任校对 / 周瑞红
责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

《国之重器出版工程》 编辑委员会

编辑委员会主任：苗 圩

编辑委员会副主任：刘利华 辛国斌

编辑委员会委员：

冯长辉	梁志峰	高东升	姜子琨	许科敏
陈 因	郑立新	马向晖	高云虎	金 鑫
李 巍	李 东	高延敏	何 琼	刁石京
谢少锋	闻 库	韩 夏	赵志国	谢远生
赵永红	韩占武	刘 多	尹丽波	赵 波
卢 山	徐惠彬	赵长禄	周 玉	姚 郁
张 炜	聂 宏	付梦印	季仲华	



专家委员会委员（按姓氏笔画排列）：

- 于 全 中国工程院院士
- 王少萍 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 王建民 清华大学软件学院院长
- 王哲荣 中国工程院院士
- 王 越 中国科学院院士、中国工程院院士
- 尤肖虎 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 邓宗全 中国工程院院士
- 甘晓华 中国工程院院士
- 叶培建 中国科学院院士
- 朱英富 中国工程院院士
- 朵英贤 中国工程院院士
- 邬贺铨 中国工程院院士
- 刘大响 中国工程院院士
- 刘怡昕 中国工程院院士
- 刘韵洁 中国工程院院士
- 孙逢春 中国工程院院士
- 苏彦庆 “长江学者奖励计划”特聘教授



- 苏哲子 中国工程院院士
- 李伯虎 中国工程院院士
- 李应红 中国科学院院士
- 李新亚 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、
中国机械工业联合会副会长
- 杨德森 中国工程院院士
- 张宏科 北京交通大学下一代互联网互联设备国家
工程实验室主任
- 陆建勋 中国工程院院士
- 陆燕荪 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、原
机械工业部副部长
- 陈一坚 中国工程院院士
- 陈懋章 中国工程院院士
- 金东寒 中国工程院院士
- 周立伟 中国工程院院士
- 郑纬民 中国计算机学会原理事长
- 郑建华 中国科学院院士



- 屈贤明** 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、工业和信息化部智能制造专家咨询委员会副主任
- 项昌乐** “长江学者奖励计划”特聘教授，中国科协书记处书记，北京理工大学党委副书记、副校长
- 柳百成** 中国工程院院士
- 闻雪友** 中国工程院院士
- 徐德民** 中国工程院院士
- 唐长红** 中国工程院院士
- 黄卫东** “长江学者奖励计划”特聘教授
- 黄先祥** 中国工程院院士
- 黄 维** 中国科学院院士、西北工业大学常务副校长
- 董景辰** 工业和信息化部智能制造专家咨询委员会委员
- 焦宗夏** “长江学者奖励计划”特聘教授



序

车用内燃机和非道路机械用内燃机的动力性、经济性技术指标的巨大差异，一直都在警示我们，汽车行业对技术和产品的改造能力令人敬畏。随着汽车电动化技术变革的加速到来，我们有理由相信，车用电驱动技术也必将经历这样一个脱胎换骨的提升过程。

就车用电驱动系统而言，过去三十年已经取得有目共睹的技术进步，这体现在功率密度的提升、转速和工作频率的提高、转换效率和环境适应性显著改善等各个方面。更深层次的，车用电驱动作为一个细分行业，无论是其产品形态、检验标准还是加工制造工艺，都已经脱胎于传统的电机行业自成体系。

展望未来，一方面来自汽车整车的技术需求不断提高，高速化、集成化和轻量化在可以预见的一段时间内仍是主流技术需求；另一方面，以碳化硅为代表的新一代功率半导体器件的大规模运用已加速到来。这都将对车用电驱动的技术和产品进步产生深远的影响。

在这样的产业变革背景下，车用电机控制技术体系中基础理论方法和模型体系的更新完善就成为不可或缺的一个环节。一方面，应该把过去几十年车用电机控制方面取得的理论成果凝练总结固化下来；另一方面，需要针对未来车用电机宽频化等技术演化趋势，做好基础理论准备。这些都是当下车用电机控制相关理论研究的迫切任务。

《车用驱动电机分布参数建模方法及其应用》一书凝聚了作者过去多年的研究心得，所提方法突破了传统空间矢量只关注电机中主要物理量基波成分的局限，直接面对电机中关键场变量的空间非正弦实质，从有限元分析中提取工



作区间内的磁共能数值结果，经过傅里叶分析等有效的数学分析手段得到完整的磁共能、磁链和转矩的解析表达。这些基础理论工作对于基于模型的车用电动机控制具有非常现实的参考价值。

车用电动机行业的健康可持续发展离不开应用基础研究工作的持续突破和创新，很高兴看到作者在这方面进行的卓有成效的探索和尝试。是为序！



前言

在可预见的一段时间内，车用电机技术进步的一个重要方向就是宽频化趋势，这体现在车用电机转速提升、工作频率提升、逆变器开关频率提升等多个方面。而宽频化需要我们在理论上做好铺垫。传统的集中参数模型仅考虑气隙磁场的基波矢量，无法有效描述实际车用电机中受到的磁饱和、气隙磁场空间谐波以及定子齿槽等诸多因素影响。基于此类空间矢量模型提出了磁场定向控制等电机控制算法，但此类算法以平均转矩为控制目标，不能描述转矩随转子位置的空间分布变化，难以满足宽频化的控制需求。

本书立足于充分描述转矩、磁链等随转子空间位置变化的空间分布特性，基于场重构的思想，建立永磁同步电机完整的解析模型，建立了能精确描述电机非线性及谐波特征的所谓“分布参数模型”。其中“分布参数”的含义体现在如下两个方面：描述了气隙磁场谐波在空间分布的规律；相比于单一的电感参数，电机模型中的参数以分布矩阵的形式存在。

首先，本书分别以磁链及磁共能两种场量为基础构建车用驱动电机的分布参数模型，其共同之处在于两种场量的数值解都是基于有限元数值分析（Finite Element Analysis, FEA）获取的，FEA 可以获取不同电流工作点下电机各个场量的准确分布情况，从而保证后续分布参数模型的建模精度。

其中，磁链重构选取电机 d 轴电流、 q 轴电流、转子空间坐标构成广义坐标，考虑到磁链在转子空间坐标维度上具有周期性，通过一维傅里叶级数展开和多项式拟合对 d 轴及 q 轴磁链数值解进行重构，进而得到以广义坐标为自变量的 d - q 轴磁链解析模型，并依据磁链与电压及转矩的关系获得电压方程及可描述转矩脉动的转矩模型，从而构建起基于磁链重构的电机分布参数模型。

而磁共能重构则是选取定子电流矢量幅值、转矩角、转子空间坐标为广义



坐标，基于磁共能在转子空间坐标及转矩角两个维度上的周期性，通过二维傅里叶级数展开和多项式拟合对磁共能数值解进行重构，再依据电机学理论和机电能量转换原理中磁共能与磁链、转矩、电压的关系，建立起基于磁共能重构的电机分布参数模型。

与基于电感的电机集中参数模型相比，所述两种电机分布参数模型不仅考虑了磁饱和的影响，更重要的是描述了电机各电磁变量（磁共能、磁链、电压、转矩等）随转子空间坐标的变化规律。通过离线仿真、硬件在环测试以及台架试验三种方式对分布参数模型进行了分析和验证。结果表明，分布参数模型能准确描述所有工作点下实际电机中电压激励与电流响应的关系以及电机转矩脉动，且其作为电机模型的离线仿真速度较快，可用于高精度电机控制的前期算法开发。

直流无刷电机相比于车用永磁同步电机，其磁场反电动势非正弦特性更为明显，将上述分布参数建模方法运用到直流无刷电机中，并通过与 FEA 仿真结果对比，充分验证了直流无刷电机分布参数模型的准确性，扩充了分布参数模型的适用范围。

其次，在构建车用电机分布参数模型的基础上，本书还探索了将该模型运用到车用驱动电机的转矩脉动抑制及故障诊断中。

一方面，不规则的谐波电流可引起转矩脉动；另一方面，针对特定电机固有特征而注入特定次谐波电流亦可达到抑制转矩脉动的目的。因此，转矩脉动抑制的关键在于如何获取抑制转矩脉动和谐波电流之间的准确关系。

分布参数模型中的转矩模型可精确描述转矩脉动，基于此，本书提出了两种抑制转矩脉动的谐波电流获取方法：基于转矩模型构建转矩观测器获取电机输出的实时转矩脉动，以该实时转矩脉动与参考转矩之差作为转矩控制器的输入，通过转矩反馈得到抑制转矩脉动的谐波电流；以定子电流矢量幅值为参数对转矩模型进行局部线性化处理，得到可精确描述局部工作点转矩脉动的低阶转矩模型，构建出以谐波电流各次幅值为未知量的线性方程组，通过方程组的求解即可在线计算抑制转矩脉动的谐波电流。

谐波电流在 1 次同步坐标系下为频率随转速成正比的交流量，传统的 PI 电流反馈控制器难以满足谐波电流控制过程中的带宽需求，而根据目标谐波电流计算谐波电压进行前馈控制则可大大提高电流控制器的快速性。本书首先基于电机集中参数模型构建了多同步坐标系下的谐波电压模型，该模型揭示了正负序谐波电压与谐波电流之间的耦合关系；为进一步提高谐波电压模型的精度，本书同样基于电机分布参数模型构建了多同步坐标系下的谐波电压模型，相比



于集中参数而言,该模型不仅考虑了谐波电流引起的谐波电压,同时还包括由于磁饱和、齿槽以及气隙磁场分布本身非正弦引起的谐波电压。通过仿真及试验,分别对谐波电流的选取方法及谐波电流的注入方法进行了分析和验证。两种谐波电流选取方法在低速时均能明显抑制转矩脉动,高速时依靠转矩反馈的谐波电流选取出现较大偏差,而基于转矩模型的谐波电流选取方法依然能输出准确的谐波电流;通过增加前馈谐波电压弥补了PI控制器对于高频增益的不足,此时控制系统在不同转速下均能保证实际谐波电流对参考谐波电流的准确跟踪,并使得转矩脉动在低速与高速时均得到有效抑制。

同样将上述转矩脉动抑制方法应用到直流无刷电机中,对比了六步换向控制、基波电流矢量控制以及谐波电流注入三种方法的转矩脉动抑制效果。结果表明,矢量控制可提升直流无刷电机在高速下的转矩输出品质,而谐波电流注入方法对直流无刷电机的转矩脉动抑制效果则更为显著。

针对永磁同步电机中隐蔽性强的传感器故障和永磁体失磁故障,提出了基于解析模型和信号处理相结合的故障实时诊断算法。采用电机分布参数模型计算磁链残差或电流残差以完成电机故障的检测。对磁链残差进行多坐标变换等信号处理后进行低通滤波获取其直流分量,再通过这些直流分量与预设阈值比较实现对不同相电流传感器偏移、倍乘,转子位置传感器偏移以及永磁体均匀失磁等故障的分离。分析表明,该方法可有效检测并识别出上述不同相电流传感器偏移、倍乘,转子位置传感器偏移以及永磁体均匀失磁等不同的电机故障,对基于模型的故障诊断相关工作具有一定的参考借鉴价值。

本书由钟再敏统筹撰写,江尚参与了第4章、第5章的撰写。此外,本书研究工作得到陈雪平、张光耀、周英坤、李俊杰等的大力协助。

本书研究工作得到自然科学基金面上项目“车用机电复合传动广义主动阻尼同步注入原理和关键技术”(51575392)等项目的资助。感谢上海汽车工业教育基金会资助出版。

感谢同济大学魏学哲、康劲松两位教授认真审阅全书。

感谢贡俊教授为本书作序。

因水平有限,疏漏在所难免,请读者不吝批评指正。

作者



符号说明

PMSM	永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor)
FEA	有限元数值分析 (Finite Element Analysis)
MTPA	最大转矩电流比 (Maximum Torque Per Ampere)
FRM	磁场重构方法 (Field Reconstruction Method)
FOC	磁场定向控制 (Field Orientation Control)
RMSE	均方根误差 (Root Mean Square Error)
FFT	快速傅里叶变换 (Fast Fouries Transformation)
R_s	定子等效电阻, Ω
L_d, L_q	d 轴、q 轴等效电感, mH
ψ_f	永磁体等效磁链, Wb
i_d, i_q	d 轴、q 轴电流, A
u_d, u_q	d 轴、q 轴电压, V
ψ_d, ψ_q	d 轴、q 轴磁链, Wb
p	电机极对数
T_e	电机电磁转矩, $N \cdot m$
T_e^{cog}	电机齿槽转矩
ω_r	转子电角速度, rad/s
ω_m	转子机械角速度, rad/s
n_{mech}	转子机械转速, r/min
ψ_M, ψ_T	M 轴、T 轴磁链, Wb
i_M, i_T	M 轴、T 轴电流, A
u_M, u_T	M 轴、T 轴电压, V



W_c	磁共能, J
W_m	磁能, J
I_s	定子电流矢量幅值, A
β	转矩角, rad
θ_r	转子电角度, rad
ω_θ	磁共能在 θ_r 维度上基波角频率
ω_β	磁共能在 β 维度上基波角频率
$V(\theta_r)$	θ_r 维度上傅里叶级数向量基底
$U(\beta)$	β 维度上傅里叶级数向量基底
N_1, N_2	θ_r 及 β 维度上最高的傅里叶级数阶次
N_3	多项式拟合最高阶次
N_4	谐波电流注入最高阶次
C^k	分布参数矩阵
$C(I_s)$	分布参数矩阵函数
Z^k	局部线性化后分布参数矩阵
$Z(I_s)$	局部线性化后分布参数矩阵函数
T_k	k 次转矩谐波幅值, N·m
I_k	k 次谐波电流矢量, A
V_{dc}	直流母线电压, V
\bar{X}	磁共能、磁链、转矩等的均值
X^*	被控量参考值
$d^n - q^n$	第 n 次同步旋转坐标系
$X_{s(m)}^n$	m 次谐波矢量在 n 次同步旋转坐标系下的表达形式
$X_{d(m)}^n, X_{q(m)}^n$	在 n 次同步旋转坐标系下 d 轴与 q 轴方向的分量
$M^k - T^k$	k 次定子电流定向同步旋转坐标系
$i_{s(l)}^k / u_{s(l)}^k$	l 次电流/电压谐波矢量在 $M^k - T^k$ 同步旋转坐标系下的表达形式
$u_{M(l)}^k$ 和 $u_{T(l)}^k$	$u_{s(l)}^k$ 在 M^k 轴和 T^k 轴上的分量
u_M^k 和 u_T^k	$\sum_{l=1}^{\infty} u_{s(l)}^k$ 在 M^k 轴和 T^k 轴上的分量



目 录

第 1 章 绪论	001
1.1 概述	002
1.2 永磁同步电机建模方法分类	007
1.3 本书的体系结构和使用方法	015
第 2 章 车用 PMSM 集中参数模型及参数提取	018
2.1 内嵌式 PMSM 物理模型	019
2.2 定子坐标系下磁链和电压矢量方程	021
2.3 同步坐标系下磁链和电压矢量方程	027
2.4 磁共能和转矩模型	033
2.5 基于 PMSM 有限元电磁场数值仿真及集中参数提取	038
2.6 本章小结	046
第 3 章 基于磁链重构的车用 PMSM 分布参数建模	047
3.1 空间分布坐标和磁链重构基本方法	048
3.2 对磁链重构基本方法的改进	052
3.3 基于磁链重构的 PMSM 分布参数模型	059
3.4 基于磁链重构的分布参数模型有限元对比验证	063
3.5 本章小结	078



第 4 章 基于重构磁共能的永磁同步电机分布参数建模	079
4.1 磁共能重构的基本方法	081
4.2 基于磁共能重构的 PMSM 分布参数模型	087
4.3 基于磁共能重构的 PMSM 分布参数模型与 FEA 结果对比	093
4.4 基于 PMSM 分布参数模型的离线仿真系统及其验证	107
4.5 直流无刷电机分布参数模型	119
4.6 本章小结	130
第 5 章 基于分布参数模型的车用驱动电机转矩脉动抑制	132
5.1 永磁同步电机转矩脉动抑制研究进展	133
5.2 基于分布参数模型的转矩/基波电流分配策略	140
5.3 主动转矩脉动抑制的谐波电流选取方法及其验证	147
5.4 谐波电压与电流耦合模型及谐波电流控制方法	162
5.5 基于分布参数模型的直流无刷电机转矩脉动抑制	182
5.6 本章小结	189
第 6 章 基于分布参数模型的车用驱动电机故障诊断探索	191
6.1 基于模型的驱动电机故障诊断研究概述	192
6.2 典型电机故障工况下系统模型分析	195
6.3 基于电流冗余变量的故障检测	197
6.4 基于磁链冗余变量的故障检测	200
6.5 故障检测算法实现	205
6.6 基于残差信号特征的故障辨识	207
6.7 电机故障诊断算法性能分析	216
6.8 本章小结	219
附录	220
附录 A PMSM 样机的相关电机参数	221
附录 B BLDC 的相关参数及六步换向法简介	225
附录 C 测试验证用电机台架	231
附录 D 分布参数建模 Matlab 文件	233
参考文献	246



第 1 章
绪 论