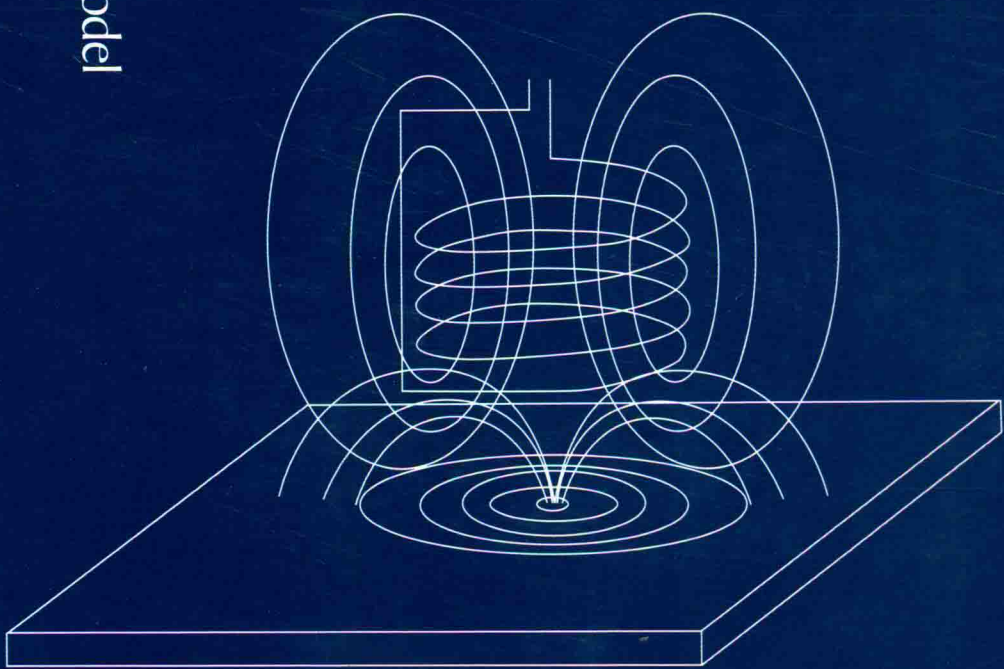


列车涡流制动机理 及制动力矩模型

应之丁 林建平 著

Mechanism and Torque Model
of Eddy Current Braking
on High-speed Train



 同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

列车涡流制动机理及制动力矩模型

Mechanism and Torque Model of Eddy
Current Braking on High-speed Train

应之丁 林建平 著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书针对涡流制动电磁场特性、作用关系和涡流电磁场强度求解方法以及涡流制动力矩计算方法展开研究。在分析涡流制动器电磁场的形式和组成、论证周期变化的涡流感应电场对励磁线圈电流影响因素的基础上,建立涡流感应电场叠加的电磁场强度计算体系框架;研究涡流制动力生成机制及相关条件,建立涡流电磁场中的磁场分布及强度变化、涡流分布和变化的分析模型;推导磁场变化幅值的计算公式,反映了电磁机构各构成要素在制动过程中的变化特征;提出了涡流制动运动电磁场解析计算过程中采用不同坐标下的规范约束条件,建立了新型实用的涡流制动力矩解析计算方法。

本书主要读者对象是高等院校、科研院所电磁技术及其应用学科的教师和科技工作者,可作为电磁场研究和电磁应用技术相关专业研究生的专业课教材,也可供从事涡流制动、电磁阻尼减振、电磁涡流加热及电磁弹射控制等其他应用研究的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

列车涡流制动机理及制动力矩模型/应之丁,林建平著.

—上海:同济大学出版社,2014.6

ISBN 978-7-5608-5459-5

I. ①列… II. ①应… ②林… III. ①列车—电磁涡流制动 IV. ①U260.357

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 054033 号

列车涡流制动机理及制动力矩模型

应之丁 林建平 著

责任编辑 季 慧 助理编辑 陆克丽霞 责任校对 徐春莲 封面设计 张 微

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 常熟市大宏印刷有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 10

印 数 1—1100

字 数 249000

版 次 2014 年 6 月第 1 版 2014 年 6 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-5459-5

定 价 36.00 元

前 言

涡流制动是一种无磨耗的制动方式,在列车高速阶段其制动力表现十分稳定,主要有圆盘和线型两种形式的制动器。

在圆盘涡流制动器中,直流励磁产生的恒定电磁场在转动的感应盘上形成变化的电磁场,磁场产生涡流并对其作用产生制动力。在这复杂变化的关系中,实际存在着涡流电磁场的形式和组成关系问题,磁场相对运动变化关系问题,磁场变化形式、频率及幅值与产生感应电流大小和分布问题,涡流制动力形成过程及作用关系问题,不同介质和结构的区域组成的转动电磁场边界问题,磁场介质参数变化及涡流对电磁场的影响作用等问题,这些问题目前从相关理论上还没有得到系统的解释。本书围绕分析电磁场产生涡流制动力的机理以及建立制动力矩的计算解析方法等核心问题展开对上述问题的研究,主要内容如下:

(1) 研究涡流电磁场形式和变化、电磁场内部作用关系,针对电磁场各要素作用关系,建立不同形式的计算子模型,构建分阶段计算电磁场各种关系的涡流电磁场求解方法和解算步骤。直流励磁恒定电磁场在转动感应盘表面及内部形成了非单一约束条件的似稳交变涡流电磁场,可采用不同坐标下的电磁场约束规范条件,分别分析磁场强度和电磁场作用关系的方法,分析涡流生成磁场的散度和旋度,了解感应盘上的涡流电磁场的基本特征,认为周期变化的涡流感应电场对励磁线圈电流影响的主要原因是互感效应。

在对涡流电磁场基本特征及作用关系研究的基础上,确立并分别讨论了磁场和感应电场变化特征的方法,建立涡流感应电场叠加的电磁场强度计算体系框架。可以较清晰地描述涡流电磁场内部复杂关系和各方面因素混合作用影响。

(2) 探讨动态变化电磁场复杂边界条件、含有不同媒介(或多媒介)的定解问题解决办法、难点和局限性,寻求反映涡流电磁场特征和作用关系的最小电磁场基本单元,确定转动涡流电磁场运动关系和约束条件,求出所需要区域的电磁场强度和涡流电动势。

以矢量磁位推导公式为基础,通过仿真计算得出了电磁场中矢量和流量的变化特征,将转盘导体电场强度公式与有效(变化)磁导率表达式等进行类比,论证涡流电磁场静态和动态的相对关系。以此建立动态变化的电磁场对应静态感应盘的运动关系,并明确了电磁场电磁力的作用关系。观察涡流电磁场各个组成部分在转动时,由于相对位置发生变化引起磁导率变化与磁场磁力线变形的关系,认为在计算运动电磁场强度时,速度项可参照磁导率变化范围取值,用于控制速度超过一定值时带来磁场计算值不稳定现象。并通过在不同磁导率条件下制动力矩的仿真计算和制动试验中的吸力变化(引起磁导率变化),初步验证了其可行性。

(3) 研究涡流制动力生成机理以及相关条件,推导旋转涡流电磁场计算模型。验证电磁场中开尔文(Kelvin)力在圆周方向几乎不增加力矩,确定洛仑兹(Lorentz)力即为涡流制动力。同时也论证了电磁力与磁导率之间的关系,也间接证明了磁场磁力线变化与磁导率变化的关系。

(4) 基于库仑规范和洛仑兹规范约束条件的涡流电磁机构解析计算模型,建立实用的涡流制动力矩解析计算方法。

基于感应电场对原磁场影响、铁磁材料特性尤其磁导率的变化影响,以及电磁机构参数、

转速、温度对电磁场产生涡流制动力和变化趋势的影响,可推导直接利用感应盘涡流感应电动势求解制动功率和涡流制动力矩公式,并用电磁场及制动力仿真计算和涡流制动试验结果验证了计算模型和计算方法的正确性。涡流制动功率及制动力矩公式反映了电磁机构各组成要素在制动过程的变化特征,并适用于制动全过程,可解决制动力矩计算公式中的高转速和低转速的区域中制动力变化规律不同的问题。

设计了刚性联结悬浮电磁机构式和柔性联结固定电磁机构式两种类型的涡流制动器,通过研制柔性联结固定电磁机构式样机和各个专项试验,验证相关理论的合理性。

应之丁

2014年1月

符号说明

符号	物理意义	国际单位或用处
E	电场强度	伏特/米, 牛顿/库仑
B	磁感应强度, 磁通密度	$B = \frac{\Phi}{S}$ 特斯拉, (Wb/m ²) 韦伯/平方米, 伏特·秒/平方米
D	电位移矢量, 电通密度	库仑/平方米, 牛顿/伏特·米
H	磁场强度	安培/米
$\nabla \cdot$	散度算符	/米
$\nabla \times$	旋度算符	/米
$\frac{\partial}{\partial t}$	对于时间的偏导数	/秒
S	曲面积分的运算曲面	平方米
L	路径积分的运算路径	米
ds	微小面元素矢量	平方米
dl	微小线元素矢量	米
ϵ_0	真空电容率, 又称为电常数	法拉/米
μ, μ_0, μ_r	μ 磁导率; μ_0 真空磁导率, 又称为磁常数; μ_r 相对磁导率, 无量纲;	国际单位制 (SI) (H/m) 亨利/米, 牛顿/安培 ² $\mu = \frac{B}{H}, \mu = \mu_r \mu_0$
γ, σ	电导率, 物体传导电流的能力	S/m, 西门子 (S) 原来被称为姆欧; $\sigma = \frac{J}{E}$
M	磁化强度	$M = \frac{\mu - \mu_0}{\mu_0} H$
ρ_f	自由电荷密度	库仑/立方米
ρ	总电荷密度	库仑/立方米
Q_f	在闭合曲面 S 里面的自由电荷	库仑
Q	在闭合曲面 S 里面的总电荷	库仑
J_f, j	J_f 自由电流密度; j 虚数单位	(A/m ²) 安培/平方米

J, J_z, J_0	J 总电流密度; J_0, J_z 分别是金属导体表面上的和导体中距表面距离为 z 处的涡流密度;	(A/m^2) 安培/平方米, $J = \frac{I}{S}$
I_f	穿过闭合路径 L 所包围的曲面的自由电流	安培
I	穿过闭合路径 L 所包围的曲面的总电流	安培
Φ_B	穿过闭合路径 L 所包围的曲面 S 的磁通量	特斯拉·平方米, 伏特·秒, 韦伯
Φ_E	穿过闭合路径 L 所包围的曲面 S 的电通量	焦耳·米/库仑
Φ_D	穿过闭合路径 L 所包围的曲面 S 的电位移通量	库仑
A	矢量磁位 或称 矢量磁势	
Φ, ϕ, φ	标量电位	ϕ - A 法、 A - ψ 法、
T	矢量电位	T, ψ - ψ 法、 T, Ω - Ω 法
ψ, Ω	标量磁位	T, Ω - Ω 法
f	磁场变化频率或电流频率	Hz
R, Z, X, G	R 电阻; Z 阻抗; X 电抗; G 电导; j 是虚数单位	欧姆(Ω); 电导(S) $G = \frac{1}{R}$
R_m, Λ, δ_i	R_m 磁阻, Λ 磁导, δ_i 各段	$R_m = \frac{l}{\mu \cdot S}$ (H^{-1}), $\Lambda = \frac{1}{R_m}$ (亨利 H)
L, M	L 电感; M 互感	
ψ	磁链, 为线圈匝数 N 乘以磁通 ϕ 量	
ϵ	电动势, 或 E	
ϵ_m	磁动势, 或 F	磁路上的安匝数 $F = Ni$, 单位为 A
h, δ, ∇	电流透入导体深度, 趋肤深度	
χ	磁化系数	
Π	应力张量	
S	电磁场能流密度矢量, 也即坡印亭 (Poynting) 矢量	焦耳/秒·平方米
P_e	涡流功率	焦耳/秒

目 录

前言

符号说明

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 涡流制动电磁机构的主要研究方法	3
1.2.1 研究涡流制动电磁机构的主要方法	3
1.2.2 涡流制动电磁场的主要计算方法	4
1.2.3 现有电磁机构研究方法的局限性	5
1.3 涡流制动电磁机理及制动力矩模型研究的主要内容	6
1.3.1 涡流制动机理研究	6
1.3.2 制动力矩模型研究	6
第 2 章 涡流感应电场叠加的电磁场计算体系框架	10
2.1 电磁场基本特性分析及研究方法确定	10
2.2 通过麦克斯韦(Maxwell)方程组分析电磁场基本关系	12
2.3 麦克斯韦(Maxwell)方程组中各个方程的实用性分析	14
2.4 涡流感应电场叠加的电磁场计算方法论证	15
2.5 表述涡流电磁场的控制方程	18
2.6 建立涡流电磁场求解体系框架和解算步骤	19
第 3 章 针对涡流电磁场特性的电磁场强度求解方法	23
3.1 电磁场计算方法研究基础和现状	23
3.1.1 基于磁路法设计磁场参数的基本特点	23
3.1.2 电磁场主要数值计算方法分析	25
3.2 涡流电磁场特性与解算方式的可行性分析	27
3.3 拉普拉斯方程求解方法的一般意义	29
3.4 基于亥姆霍兹(Helmholtz)方程求解的计算方法特点	29
3.5 采用基因遗传算法结合 Powell 优化法确定待定系数	30
第 4 章 涡流电磁场的数值求解过程及相关因素的变化规律	35
4.1 涡流电磁场的数值求解过程	35
4.2 微分方程的定解条件	39
4.3 场域离散成有限单元	41

4.3.1	变分法的区域离散化	41
4.3.2	加权余量法的区域离散化	45
4.4	二维模型与三维模型仿真计算差异分析	51
4.4.1	结构模型的建立和算法	51
4.4.2	二维电磁场中磁感应强度垂直分量与圆周面磁场强度分析	51
4.4.2.1	定义物理尺寸	51
4.4.2.2	定义模型区域材料特性	52
4.4.2.3	划分网格	52
4.4.2.4	加载边界条件和载荷	52
4.4.2.5	计算求解和后处理	53
4.4.2.6	建立动态旋转感应盘电磁场模型	53
4.4.3	二维电磁场直径截面的磁场强度分析	57
4.4.4	二维与三维电磁场仿真计算结果比较分析	59
第5章	涡流制动力计算模型分析	64
5.1	涡流制动原理及电磁场洛仑兹(Lorentz)力分析	64
5.2	电磁场开尔文(Kelvin)力推导与磁导率论证	67
5.3	能量平衡公式计算制动力	71
5.4	典型的涡流制动力计算方法分析	73
第6章	基于库仑规范和洛仑兹规范的电磁机构解析模型及计算方法	78
6.1	变化的涡流电磁场模型分析	78
6.2	涡流制动电磁机构解析计算模型	81
6.3	涡流制动感应盘电磁场强度计算	85
6.3.1	折线法推解电磁场强度	85
6.3.2	参数方程法推解电磁场强度	86
6.4	感应盘涡流分布分析	93
6.5	涡流的趋肤效应和透入深度	93
6.6	涡流电磁铁线圈产生的阻抗分析	94
6.7	涡流制动力矩计算方法	99
第7章	涡流制动器电磁作用下的温度影响分析	104
7.1	涡流制动转盘传热方式	104
7.2	涡流制动器转盘温度场模型	105
7.3	热源强度、边界条件和初始条件的确定	106
7.3.1	内热源强度	106
7.3.2	等效表面对流换热系数	107
7.3.3	边界条件和初始条件	107
7.3.4	网格划分	108
7.4	模型求解	108

7.5 温升对电磁材料的参数影响	109
第8章 涡流制动器制动力计算和试验结果比较分析	112
8.1 涡流制动器的形式和结构	112
8.2 涡流制动力计算分析	113
8.3 电磁机构主要参数对制动力的影响	116
8.3.1 电磁铁电流大小和磁极排列的影响	116
8.3.2 电磁机构气隙与转盘厚度的影响	117
8.3.3 电磁材料影响	119
8.4 温升对制动力的影响	121
8.5 涡流制动器台架试验项目和试验方法	121
第9章 总结与展望	126
9.1 涡流制动器电磁场研究工作总结	126
9.2 涡流制动器电磁场研究工作展望	127
附录 电磁机构设计的基础理论体系	128
1 电磁机构设计的基础理论体系框架	128
2 电磁保守场及其数学描述	129
2.1 保守场与矢量函数的概念	129
2.2 矢量场的散度和旋度	129
2.3 标量电位和矢量磁位	131
3 电磁场常用的铁磁介质及其特性	131
3.1 常用的铁磁介质	131
3.2 铁磁介质的磁化	132
3.3 磁滞回线	133
3.4 铁磁材料和材料工作点	133
3.5 磁化曲线解析表示法	135
4 基于磁路法磁场参数设计方法	135
5 应用于涡流电磁场的主要数值计算方法	137
5.1 积分方程法	138
5.2 矩量法	138
5.3 边界元法	138
5.4 有限差分法	138
5.5 有限元法	139
5.6 加权余量法	143
5.7 时域有限差分法	144
5.8 电磁场计算软件简介	144
6 电磁场计算方法的变化发展分析	145
6.1 有限元法技术发展分析	145

6.2	多场耦合问题探讨	146
6.3	电磁机构瞬变过程的求解方法	147
6.4	解析和数值方法组合-半解析数值方法	148
6.5	非线性电磁场解决方法	148
6.6	工程材料电磁特性精细化模拟	148
6.7	吸收相关学科的成果改进计算方法	148
6.8	电磁场计算方法难以解决的问题	149



第1章

绪论

1.1 概述

现发展的高速列车的制动系统主要依靠机械盘形制动,并采用了再生制动或电阻制动^[1]。机械制动在最重要的高速区域制动力有明显下降趋势,而且闸片磨耗较大,制动盘难以独立承担频繁的制动停车^[2]。再生制动受制于线路电网和交流设备,高速区机械特性为等功率,各国都没有将其作为紧急制动考核方式。大功率的电阻制动的布置和散热也是难以解决的问题。如能在列车高速区使用涡流制动,在低速或即将停车时再采用机械盘形制动,则大大降低盘片磨耗,最大程度节省列车整备和检修时间,能充分提高高速列车运营效率。日本新干线、德国 ICE3、法国 AGV 等高速列车上应用或试用涡流制动已经显示很多优势^[3-9],涡流制动在列车高速阶段制动力稳定性的表现令人印象深刻,因此被公认为是十分重要的、需要加强发展的制动技术。

有关涡流制动技术已有不少的探索性科研成果,主要应用于汽车涡流缓速器及升降减速和电磁阻尼机构等其他方面^[10-13]。现有缓速器功率较小,实际应用于高速列车大功率涡流制动仍然存在一系列技术难题。相关科研机构 and 高校已研制出了一些针对磁悬浮列车、高速列车的涡流制动试验装置和试验样机^[6,14]。涡流制动主要应用形式有圆盘和线型结构两种,二者作用原理相同。为便于试验,研究模型大都以模拟盘形结构为主。在包括对涡流制动机理、动态变化过程、影响因素以及结构优化等涉及专业理论深度研究方面还有不少欠缺,研究涡流制动机理有以下最为关键的两个方面内容:

1) 变化的电磁场产生涡流的机理和变化特征、感应电场与原有电磁场作用关系

麦克斯韦提出的涡旋电场的概念,电磁铁线圈中电流变化或电磁场转动变化,感应盘(涡流制动器内称制动盘或转盘,下同)处在交变磁场中产生涡旋状感应电流即电涡流,简称涡流。但变化的电磁场实际产生涡流的机理以及相关条件不清楚,形成电磁场的各要素包括电磁铁芯和线圈、感应转盘、电流、转速,以及材料和结构等无法直接确定。由于一般金属的电阻很小,因此涡流可达非常大的程度,是变化电磁场的主要物理现象,在运动变化电磁场里存在复杂的作用关系和变化特征。电磁场闭合曲面内既有极化电荷又有自由电荷,电磁场内产生作用力又有几种,与形成涡流制动力有关的磁、电场作用关系需要深入研究。

2) 涡流的机械效应和热效应

涡流的机械效应是指制动时电磁场产生的作用力,国内外相关文献普遍采用楞次定律解

释:当磁场产生变化时,为了抵消这种变化,运动的物体内部产生涡流,它所产生的磁场阻碍了原磁场的变化。另一方面,产生的涡流也会因为洛仑兹力的产生,使运动的物体有停止的趋势^[3-4,15-18]。这种观点在实际求解作用力时理论上没有直接反应涡流电磁场特征和电磁场与电磁力的相互关系。

涡流的热效应是指制动时电磁场产生的强大涡流在金属内流动时的电阻生热,会释放大量的焦耳热,可消耗列车的动能,并对电磁场强度及产生涡流制动力矩有直接影响^[19-20]。

涡流的机械效应和热效应统归为物理效应。根据涡流电磁场的特性和物理效应^[19-22],所提出的涡流制动器的最重要的性能评价指标如下。

(1) 额定制动力矩和平均制动力矩

额定制动力矩是指涡流制动器的最大制动力矩,是评价涡流制动器性能优劣的基本指标。平均制动力矩是指在一次制动过程中的主制动时间内,制动力矩与制动时间所围的面积除以主制动时间 t 所得的值,即

$$\bar{M} = \frac{\int_0^t M(t) dt}{t} \quad (1-1)$$

式中 \bar{M} ——涡流制动器的平均制动力矩(N·m);

$M(t)$ ——涡流制动器的瞬时制动力矩(N·m)。

(2) 抗热系数

涡流制动器工作一段时间后产生的热量不能及时散发引起转盘的温度不断上升,而制动力矩由于温度影响会有所下降。涡流制动器抗热系数是指在同一转速下,涡流制动器的制动力矩在两个给定的温度之间(通常一个温度为常温),被测量的相对变化量除以温度之差称为涡流制动器的抗热系数,即

$$\alpha_M = \frac{\Delta M}{M \Delta T} \quad (1-2)$$

式中 α_M ——涡流制动器抗热系数;

ΔM ——不同温度下的涡流制动器制动力矩的变化量(N·m);

M ——初始温度下的涡流制动器制动力矩(N·m);

ΔT ——温度的变化量(°C)。

涡流制动器抗热系数反映了涡流制动器的制动力矩随温度升高而下降的程度。抗热系数越小,高温下涡流制动器制动力矩的下降幅度越小,涡流制动器抗热衰退性能越好。

高速列车要求涡流制动功率大,需要充分利用材料电磁特性。理想的涡流制动器具有:功率大而制动力平稳,效率高、所用电源较小,电磁干扰少,反复制动过程中电磁特性稳定和高可靠性,控制灵敏及与其他制动方式配合的适应性,持续制动温度可控,结构紧凑小巧、重量较轻,以及适宜在转向架上安装等品质^[3]。这要求对电磁理论进行比较深入全面地研究,掌握其机理和内在规律性并建立适用于高速列车涡流制动设计的思路 and 理论计算方法。

国内外有关涡流制动的研究著作及报告已对电磁场计算方法、仿真计算模型、计算涡流制动力值有了很多论述,但针对涡流制动电磁场复杂的组成与作用关系的专项研究还比较少。特别是励磁电流产生的电磁场、变化的磁场产生的感应电流的研究,旋转电磁场的分布和变化规律,感生磁场和感应电场与原有励磁的磁场和电场的作用关系,运动的电磁场与变化的电磁

场相似和作用关系的区别,能流的传递过程等涉及制动功率和制动力解析计算模型等关键内容还缺乏深入地研究。

因此,需要深入研究有关涡流制动的电磁场理论和电磁场计算技术,分析涡流电磁场组成和特性、电磁相互之间作用以及电磁场各要素的影响,研究涡流制动力生成机理以及相关条件,寻求建立可指导高速列车涡流制动器机构设计的涡流电磁场计算模型、数据处理方法和涡流制动力矩的计算方法,并通过涡流制动试验装置的试验验证。进一步掌握各种工况条件下涡流电磁场结构参数、电磁场组成要素对涡流制动特性的影响,为设计先进的涡流制动装置提供技术支持。

1.2 涡流制动电磁机构的主要研究方法

1.2.1 研究涡流制动电磁机构的主要方法

1. 现有电磁机构设计的基本思路

国内外文献提出了很多具体电磁机构研制方法和经验,比较认可的完整设计过程归纳起来包括:采用解析计算法和数值计算方法计算电磁场强度,并得到涡流制动的制动力与相关要素之间的曲线关系,设计试验系统试验验证。用解析法做定性分析、指导电磁机构设计的方案设计,用有限元法分析涡流制动电磁场的强度分布,以期优化结构细节,并结合试验和经验公式的数据,设计样机,做进一步理论分析和试验;大多数文献实际应用的是比较成熟的二维分析模型,对时空瞬态变化的涡流电磁场三维数值计算方法做了很多专项研究,并做了很多技术处理。从宏观上看,电磁场仿真计算一些数据已比较接近实际试验结果^[23-30]。

2. 涡流制动力矩的计算方法

制动力矩是衡量涡流制动结构的主要指标,但是精确计算制动力矩目前是困难的,制动力矩的大小受到很多因素的影响,制动力矩计算是当前研究的热点,同时也是难点。Salon 等对旋转传导圆盘上涡流和磁通分布运用有限元方法进行三维瞬态磁场模拟计算^[31],为精确计算制动力矩提供了理论研究方向。Collan 提出了一种新的、利用虚构的、类似于二维磁场代替平面上感应出的涡流计算制动力矩的方法^[10],计算过程基于虚构场电流的自感和互感。Muramatsu 等运用移动坐标系进行了三维直流稳态涡流分析^[18,32],即使是网格数目很大时也能获得稳定的涡流分布,制动力矩计算值同试验结果基本一致。仅仅通过调整改变指定变量并不能达到提高制动力矩的目的。为此 Takahashi 运用罗森布朗克(Rosenbrock)优化方法^[13,32],制动力矩比优化前提高了 1.39 倍。Natsumeda 等将有限元同 Rosenbrock 方法以及直接研究的方法用于永磁式缓速器的三维优化设计^[18],结果表明,制动力矩增加约 50%,且迭代次数和 CPU 运行时间可减少(Rosenbrock 法类似 Simplex 法,单纯形法),结构简单、收敛速度较快,但对初值敏感性强,易陷入局部最优,优化性能不稳定^[33]。国内有关文献提出了采用基于遗传算法的优化算法以及基因法等^[34]。Gay 在涡流缓速器二维分析模型的基础上,利用三维有限元方法对影响涡流缓速器力矩-速度曲线的参数进行了深入的分析^[15,23],尽管这种方法受当前有限元分析技术和材料非线性影响有一定的局限性,但优化结果还是能基本满足要求。Jang 等考虑初级铁板的 B-H 非线性特征,运用二维解析方法分别计算了用直流电励磁、Halbach 方式(近似理想结构)磁化和垂直磁化的永磁体为励磁产生的磁力,并与试验数据进行了比较^[24,35]。Edwards、Lequesne 等针对双面的非磁性反应板的永磁涡流型制动,基于永磁体等量体电流提出了一种新的分析模型^[36-39],并且推导当次级板运动时制动力的表达式。国

内专家应用复矢量磁位方法,分析了缓速器内部的磁位分布,计算了转鼓中的涡流损耗,推导了缓速器的制动力矩计算公式^[40-41],以反映缓速器制动力矩与各设计参数之间的相互关系。Enokizoiio等在缓速器设计中运用逆风插值函数有限元方法,为磁体和轭铁的结构设计提供了很好的帮助^[13,42-43]。

3. 电磁机构温度场的计算方法

涡流制动时把列车巨大动能主要转化为电磁场热能,因此分析制动机构温度场变化对制动功率的影响是最重要课题之一。国内外在建立温度场的计算模型方面,比较典型的方案是运用虚拟边界法和传热学理论推导转盘稳态温度场的计算公式,建立转盘瞬态温度场的计算模型,运用拉普拉斯(Laplace)变换法推导缓速器转鼓(或盘)瞬态温度场的计算公式,利用伽辽金(Galerkin)法推导温度场的有限元方程,分析转盘的瞬态温度场,并分析径向和轴向方向的温度与时间的分布规律^[44-46]。Akay、Hofmann、Noguchi、Yamashita等基于三维有限元方法的瞬态热传递、弹塑性蠕变与热应力分析结果以及转盘钢蠕变疲劳性能,利用应变范围划分方法和蠕变-疲劳损伤定律对涡流缓速器转盘的蠕变-疲劳寿命进行预测,预测值同实际缓速器的热循环测试结果一致^[47-49,51-52]。一些专家在建立了转盘温度和应力场的计算模型时运用 Bessel 方程推导缓速器转盘温度场和应力场的计算公式^[53-57]。

4. 试验分析研究方法

因为涡流制动机构电磁场复杂性,尤其提到动态三维非线性时空场计算模型现阶段还没有广泛适用的成熟的计算方法,还需要通过试验来做进一步分析^[52]。包括日本、德国在高速列车涡流制动技术试验研究方面做了大量工作,主要分析测算大功率涡流制动器制动力在不同速度阶段的特性和温度变化,日本铁道综合技术研究所专门设计的制动性能试验台对涡流圆盘制动装置的速度与转矩特性、温度特性、减速时间以及制动力控制进行了试验。内田、小原孝则利用试制装置研究了旋转型涡流制动装置的基本性能^[58]。Gay建立了试验台,将试验结果同二维解析方法以及三维有限元分析方法获得的计算结果进行了比较,最大制动力矩较好地吻合^[11,15-16]。

1.2.2 涡流制动电磁场的主要计算方法

涡流制动的基本原理是导体在磁场中运动,通过切割磁力线而产生感应电动势,形成涡流,进而产生制动力,计算电磁场强度是制动力计算的基础。从国内外大量文献资料来看,有关产生的涡流电磁场强度计算方法主要有以下两大类^[59-62]:

1. 解析法

此类方法通过简化磁场,认为磁场呈规则分布,如呈正弦分布,然后进行数学推导,最后给出磁通密度的数学表达式,进而得到制动力的公式。典型的磁路计算方法简化复杂的电磁场为磁路推导磁场强度。特点是:各物理量关系明确,计算过程简单。但由于各个条件不同程度简化,所得到计算模型只可了解个别因素对电磁机构制动效果的影响,难以直接分析设计电磁场结构各个要素变化影响,比较适合规律性探索和研究。

2. 数值法

从 Silvester 和 Chari 在 20 世纪 70 年代首次使用有限元法求解电磁场问题以来,在电磁场及其他领域中已成为一种非常有效的、最为流行的数值计算方法。主导的数值计算方法是从基本的 Maxwell 方程出发,经一系列推导,得到适用于计算机求解的有限元方程。此类方法的特点是:能够给出电磁场的分布情况,使计算更加精确。

从 Maxwell 方程到有限元方程一般经典解算过程如下:

(1) 对于特定的问题,划分区域,包括运动导体和其他不动部分,列出 Maxwell 方程并给定边界条件。

(2) 为了方便求解,引入磁位和电位,并采用库仑规范或洛仑兹规范,可将 Maxwell 方程组及边界条件整理成只含电位和磁位的方程,利用矢量磁位法,使方程只含矢量磁位,得到非线性双旋度方程。

(3) 利用矢量加权余量法(Weighted residual technique)将上步得到的方程离散化,涉及一些数学及有限元的基本概念,如加权函数、格林公式、散度定理、形状函数、伽辽金法,如果源电流按正弦规律变化,则还要涉及复矢量方程,经离散后得到矩阵方程。

(4) 导体在磁场中运动会产生感应电场,在导体内部产生涡流。一般称之为速度项,该速度项使得电磁场有限元方程具有非对称性。采用常规有限元方法求解这类方程时,当速度较大,单元的雷诺数(Peclet 常数)大于 1 时,伽辽金有限元解会产生数值振荡。为消除解的振荡,1982 年 M. Odamura、M. Ito 等人将流体力学中的逆风法(Upwind Method)应用于运动电磁场问题,获得了稳定的数值解。

涡流制动力矩的求解基础主要是电磁场数值计算方法,已取得很多优秀成果,但在三维涡流场方面的计算,尤其是涡流场与其他物理场的耦合问题仍有大量难题尚待解决。从应用角度看,目前电磁场数值方法在两维和三维恒定场、两维涡流场和瞬态场方面的研究已较完善。计算方法包括如以场矢量为变量的直接法和以位函数为变量的间接法以及棱边单元法等方法已被成功应用^[44]。

在方程求解中以电场强度矢量 E 和磁场强度矢量 H 等电磁场量为求解对象,直接法优点是库仑规范和洛仑兹规范对控制方程的约束保证了解的唯一性,对涡流场问题数学模型的求解精度有一些判断方法,精度较高,缺点是未知量较多,边界条件的处理比较繁杂,方程计算量大。因此,对计算机的性能要求较高。间接法以位函数为求解变量,具有灵活、方便的优点,是目前被广泛采用的方法。

1.2.3 现有电磁机构研究方法的局限性

现有的解析方法绝大多数仍沿用传统的磁路设计方法,是基于电磁场宏观效应(将“场”归结为“路”),大量统一和简化物理场,有一定随意性,求解范围也有限,难以直接分析电磁场产生涡流的各个要素之间相互关系、变化影响以及场域内分布变化;一些学者探索研究磁场对涡流作用力的关系有很大突破,但假设等效磁路与实际涡流分布和作用关系仍有差距。

类似涡流电磁场这种三维瞬态非线性场有限元问题,现有研究观点和解算思路是寻找更复杂深奥的计算理论和方法,国内外学者也做了艰辛的探索。建立现代数值计算方法,也是从研究分析 Maxwell 方程出发,经一系列电位、磁位变通推导,在公式展开、网格剖分、单元处理各个环节设置各种条件和边界假设,对计算场域进行空间离散以外和对时间变量进行离散,采用多种数学方法组合求解的有限元方程,计算极为复杂诡异、规模庞大,很多场合难以确认计算结果与实际电磁场相似程度^[29,60-63]。

工程电磁场问题的计算精度在于所研究区域中各种材料电磁特性参数的准确模拟,而材料的非线性、各向异性等特性研究均在现有的解法中难以反映。对于非线性和非对称方程,网格剖分、节元和边界处理以及多物理场耦合问题等都给数值解法带来巨大困难,不规则边界形状的场域或场域中存在铁磁媒质时难于用边界条件确定待定系数,数值解会产生数值振荡而须设置权



函数。应用的数学方法难度登峰造极却不能适应实际动态变化和复杂的工况条件。

综合采用工程试验数据和经验公式、商业电磁计算软件进行专项或局域场核算,设计电磁结构,对实际应用于动态的涡流制动装置电磁结构研制帮助有很多局限。

1.3 涡流制动电磁机理及制动力矩模型研究的主要内容

1.3.1 涡流制动机理研究

涡流制动机理的研究目的是掌握制动工况下涡流电磁场结构参数变化规律、电磁场组成要素对涡流制动特性的影响效果,为研制应用于高速列车的涡流制动装置提供技术准备。涡流制动机理研究的具体目标是:

(1) 通过电磁场理论和计算方法的研究,能清晰分析涡流电磁场中磁场与电场关系、传导电流与位移电流在涡流感应盘中变化特征,建立的电磁场模型和计算方法体现旋转电磁场的分布和变化规律,感生磁场和感应电流与原有励磁的磁场和电流的作用关系,运动的电磁场的作用关系等。

(2) 分析和建立综合考虑各关键要素对涡流电磁场影响的计算体系和制动力矩计算方法,将变化复杂的涡流电磁场计算问题剖解为要素相对简单的、作用关系明确的、不同形式界面的计算子模型,能分别反映电磁场几何关系、运动关系、电动力学关系等特质又能分析涡流制动力综合效果的计算方法,并以此计算为基础、设计涡流制动装置样机,予以试验数据验证。利用该方法对涡流制动器的各主要参数如励磁电流、制动气隙、涡流盘尺寸、电磁铁尺寸及排列方式、电磁材料参数等进行技术分析以期改进设计。

(3) 研究在列车结构参数限制或规定运动条件下,动态电磁场中涡流制动力矩与励磁电流相互关系和影响因素,以求得在实际工况下,在各个速度阶段充分应用涡流制动效能,并能有效控制涡流制动特性。

(4) 研究高速列车巨大制动能量形成的热能量对制动特性影响、制动热容量以及与制动结构设计的关系。在分析涡流制动温度场的特性基础上,从理论上预测涡流制动应用效果,达到或超出制动装置结构稳定性所规定的极限温度。

系统研究电磁结构设计中的电磁场分布规律和作用关系,结合电磁场解析计算步骤和有限元场量计算的观点,把综合的变化的涡流电磁场按规律分解开来,关注相互之间的内在关系,将现有分别考虑的设计内容尽可能联系起来考虑,并给出分析和设计方法,克服现有设计方法缺陷,形成更为系统和精确的电磁结构设计方法体系框架。

1.3.2 制动力矩模型研究

本书主导思想是将复杂的涡流电磁场计算问题剖解为要素相对清晰、作用关系明确的计算子模型。通过电磁场理论研究涡流电磁场的组成和作用关系,划分电磁场基本几何单元,以成熟的计算方法分析各单一电场和磁场的特征,并结合仿真计算结果,寻找磁势、磁场强度变化规律和影响因子的强弱,确定电场磁场运动关系界面和电磁作用关系界面,形成一个以主导电磁场为计算主体,针对不同界面形式的子模型,分别进行分析计算,在计算各个阶段考虑各个要素的相互影响作用,并将计算结果有机组合的计算过程。建立能直接反映涡流电磁场特性的、电磁相互作用关系的涡流制动功率和制动力矩的计算体系框架,导出与涡流电磁场具体