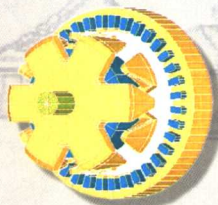


# 爪极电机的 结构、理论及应用



ZHAOJI DIANJI DE  
JIEGOU LILUN JI YINGYONG

● 王群京 倪有源 李国丽 编著

中国科学技术大学出版社

# 爪极电机的 结构、理论及应用

王群京 倪有源 李国丽 编著

中国科学技术大学出版社

2006·合肥

## 图书在版编目 (CIP) 数据

爪极电机的结构、理论及应用/王群京, 倪有源, 李国丽编  
著. —合肥: 中国科学技术大学出版社, 2006.1

ISBN 7-312-01864-5

I. 爪… II. ①王… ②倪… ③李… III. 电机 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 136734 号

中国科学技术大学出版社出版发行

(安徽省合肥市金寨路 96 号, 邮编: 230026)

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本: 850×1168/32 印张: 7.625 字数: 205 千

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月第 1 次印刷

定价: 18.00 元

# 前 言

爪极电机制造简单、成本低，可广泛应用于各种场合。爪极电机的种类有很多，总体上可分为爪极发电机和爪极电动机两大类，而汽车用爪极发电机是本书介绍和分析的重点。由于爪极电机特殊的结构，爪极发电机的磁场具有明显的三维特性，需要用三维数值和解析方法进行求解。本书给出了电磁场计算的基本方法，并且通过电磁场计算可以进一步得到发电机的相关参数，如电感、电磁力、电磁噪声和涡流等，而混合励磁爪极发电机是一种新型结构的发电机，由电励磁和永磁励磁相结合，具有可以调节、控制磁场的优点，且可以改善爪极发电机的低速输出性能。

随着现代汽车中电力负载的日益增长，对汽车电气系统的需求也相应增长。目前汽车用爪极发电机的输出电压是 12V 或 24V，而未来汽车用爪极发电机的输出电压将可能是 42V。传统的汽车用爪极发电机系统中是采用二极管整流桥对输出的三相电压进行整流，缺点是效率低且不可控，因此本书也介绍了国际上最新型的汽车用爪极发电机控制系统，可以明显提高系统的工作效率。

本书共分八章，内容简介如下：第 1 章将爪极电机分为爪极电动机和爪极发电机，在此基础上分别介绍了几种爪极电机的结构。第 2 章介绍了交流发电机的分类、汽车用爪极发电机的结构及其工作原理。第 3 章阐述了用各种方法计算汽车用爪极发电机的电磁场及各种参数等。第 4 章详细给出了能量摄动法的公式，并在计算爪极发电机三维磁场的基础上，用能量摄动法计算汽车用爪极发电机的绕组电感，同时介绍了如何用励磁电流方法和电枢电压方法获得换相电感。第 5 章介绍了汽车用爪极发电机的电

磁力、电磁噪声以及定子位移的理论分析和计算。第 6 章介绍了用三维有限元方法计算汽车用爪极发电机涡流以及涡流损耗，并通过损耗计算得到发电机的效率。第 7 章介绍一种正在研究的汽车用混合励磁爪极发电机的结构，并采用三维有限元方法和三维等效磁网络方法计算发电机的参数。第 8 章介绍了国际上研究的一种汽车用爪极发电机滑模观测器、汽车用双电压爪极发电机系统以及转速给定控制方法的新型控制系统，最后介绍了汽车用爪极发电机控制系统的现状及发展趋势。

本书可供电气工程专业本科生、研究生和工程技术人员参考。

本书受国家自然科学基金项目（50077005）资助。

限于作者水平，加之时间有限，书中难免错漏和不妥之处，殷切希望读者给予批评、指正。

编 者

2005 年 12 月

# 目 录

前 言 .....	I
<b>第 1 章 爪极电机的种类 .....</b>	<b>1</b>
第一节 爪极发电机 .....	1
第二节 爪极式永磁电动机 .....	13
第三节 爪极式电励磁电动机 .....	23
<b>第 2 章 汽车用爪极发电机简介 .....</b>	<b>34</b>
第一节 交流发电机的分类 .....	35
第二节 汽车用爪极发电机结构简介 .....	36
第三节 汽车用爪极发电机工作原理 .....	40
<b>第 3 章 汽车用爪极发电机的电磁场计算 .....</b>	<b>54</b>
第一节 电磁场的计算方法 .....	54
第二节 用二维方法计算汽车用爪极发电机电磁场 .....	58
第三节 用二维方法和三维方法计算汽车用爪极发电机电磁场 .....	61
第四节 用三维方法计算汽车用爪极发电机电磁场 .....	67
第五节 汽车用爪极发电机耦合电路模型 .....	83
第六节 用电磁耦合网络模型仿真汽车用爪极发电机 .....	92
<b>第 4 章 汽车用爪极发电机的电感计算 .....</b>	<b>98</b>
第一节 能量摄动法 .....	98
第二节 汽车用爪极发电机绕组电感计算 .....	102

第三节	汽车用爪极发电机换相电感计算 .....	116
<b>第 5 章</b>	<b>汽车用爪极发电机电磁力、电磁噪声和位移计算</b>	<b>123</b>
第一节	汽车用爪极发电机电磁力计算 .....	124
第二节	汽车用爪极发电机电磁噪声计算 .....	135
第三节	汽车用爪极发电机定子位移计算 .....	149
<b>第 6 章</b>	<b>汽车用爪极发电机效率计算</b> .....	<b>154</b>
第一节	汽车用爪极发电机损耗计算 .....	155
第二节	汽车用爪极发电机效率计算 .....	171
<b>第 7 章</b>	<b>一种汽车用混合励磁爪极发电机</b> .....	<b>174</b>
第一节	一种汽车用混合励磁爪极发电机结构 .....	174
第二节	汽车用混合励磁爪极发电机参数计算 .....	176
<b>第 8 章</b>	<b>汽车用爪极发电机控制系统</b> .....	<b>189</b>
第一节	汽车用爪极发电机滑模观测器 .....	189
第二节	双电压汽车用爪极发电机系统 .....	207
第三节	转速给定控制方法的新型控制系统 .....	211
第四节	汽车用爪极发电机控制系统展望 .....	218
<b>参考文献</b>	.....	<b>230</b>

# 第 1 章 爪极电机的种类

爪极电机由于制造简单且成本低而广泛应用于各种场合。爪极电机的种类有很多，目前还没有文献将其详细地分类。按照用途，可以将其分为爪极发电机和爪极电动机两大类。爪极电动机又分为爪极式永磁电动机和爪极式电励磁电动机。本章比较详细地介绍了汽车用有刷爪极发电机、汽车用无刷爪极发电机、宇航用爪极发电机、爪极式横向磁场电动机、爪极式永磁步进电动机、爪极直线脉冲电动机、爪极永磁同步电动机、爪极式交直流两用电动机以及多相爪极电动机的结构。

## 第一节 爪极发电机

### 一、汽车用有刷爪极发电机

汽车用有刷爪极发电机可以分为电励磁有刷爪极发电机和混合励磁有刷爪极发电机。

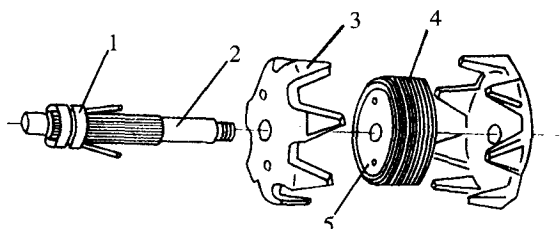
#### 1. 电励磁有刷爪极发电机

电励磁有刷爪极发电机 (Claw Pole Alternator) 一般由爪极转子、定子、硅整流器、前后端盖、风扇和皮带轮等组成。

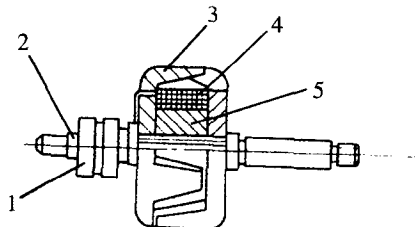
(1) 爪极转子。有刷爪极发电机的爪极转子由轴、两块爪极、励磁绕组和滑环等组成，如图 1-1 所示。两块爪极压装在转子轴上，在两块爪极的空腔内装有磁轭，其上套有励磁绕组，励磁绕组由高强度漆包线绕制而成，滑环由彼此绝缘的两个铜环组



成，一般采用酚醛玻璃纤维塑料压成一体，然后将其压到轴上。励磁绕组的两个引出线分别焊在与轴绝缘的铜环上。滑环的外圆表面应平整光滑，以便转子高速运行时与电刷之间能够滑动接触。当两个电刷通电时，励磁电流产生轴向磁通，使得一块爪极被磁化为 N 极，另一块被磁化为 S 极，从而形成了互相交叉的 N、S 磁极。



(a) 零件分解图



(b) 投影剖视图

1-滑环 2-轴 3-爪极 4-励磁绕组 5-磁轭

图 1-1 爪极转子的结构

(2) 定子。有刷爪极发电机的定子由定子铁心与三相绕组组成。定子铁心由定子片叠压而成，定子片由电工薄钢板冲制而成。为防止磁损失，定子片两侧涂绝缘漆或进行氧化处理。定子片之间叠压后，采用氩弧焊焊牢，或采用铆接。定子铁心的槽内可嵌放三相绕组。

(3) 硅整流器。一般汽车用有刷爪极发电机在定子中产生

的三相交流电通过硅二极管整流器整流为直流电。大多数整流器由 6 个硅二极管与定子三相绕组引线连接成桥式全波整流电路，其中，3 个负极二极管压装在后端盖上，另外 3 个正极二极管压装在一块整体的元件散热板上，如图 1-2 所示。元件散热板用铝合金压铸而成，它被装在后端盖上，并用绝缘材料制成的垫片与后盖隔开。正极接线柱从元件散热板引到发电机外部，即发电机“+”接线柱；负极接线柱直接从前盖引至发电机外部，即发电机“-”接线柱。发电机发出的交流电经硅整流器整流后的直流电，从交流发电机的正接线柱输出，经车内用电装置到车身，再到发电机外壳形成回路。

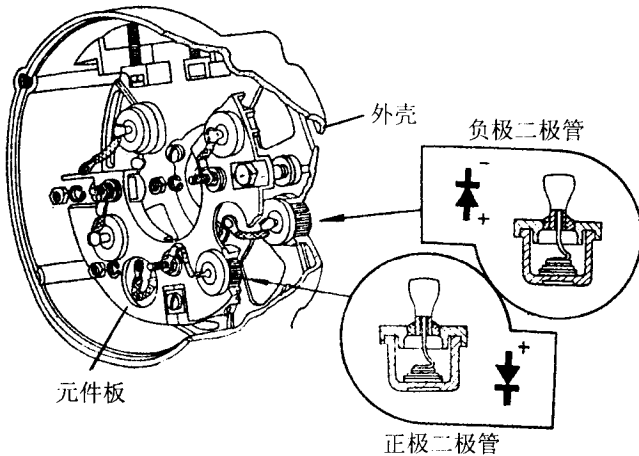


图 1-2 硅整流器与后盖装配的结构

(4) 前后端盖。前后端盖均由铝合金压铸而成，采用非导磁材料——铝合金制成的前后盖，可以使爪极式交流发电机的漏磁减少，同时具有轻巧、制造工艺好和散热性良好等优点。为提高轴承孔的机械强度，增加其耐磨性，有的发电机端盖轴承座内镶有钢套。

图 1-3 所示为一台 28V、35A 电励磁爪极发电机定转子结构

示意图, 图 1-4 至图 1-6 所示为发电机定转子尺寸, 图 1-7 所示为定子三相绕组展开图。

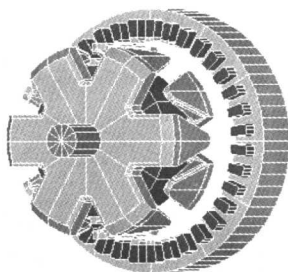


图 1-3 电励磁爪极发电机结构

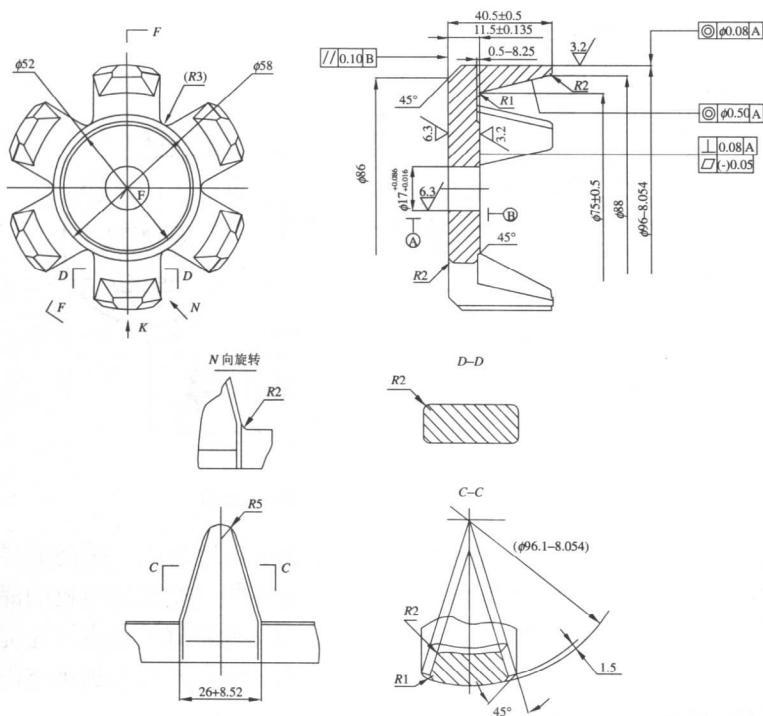


图 1-4 转子爪极盘的结构图



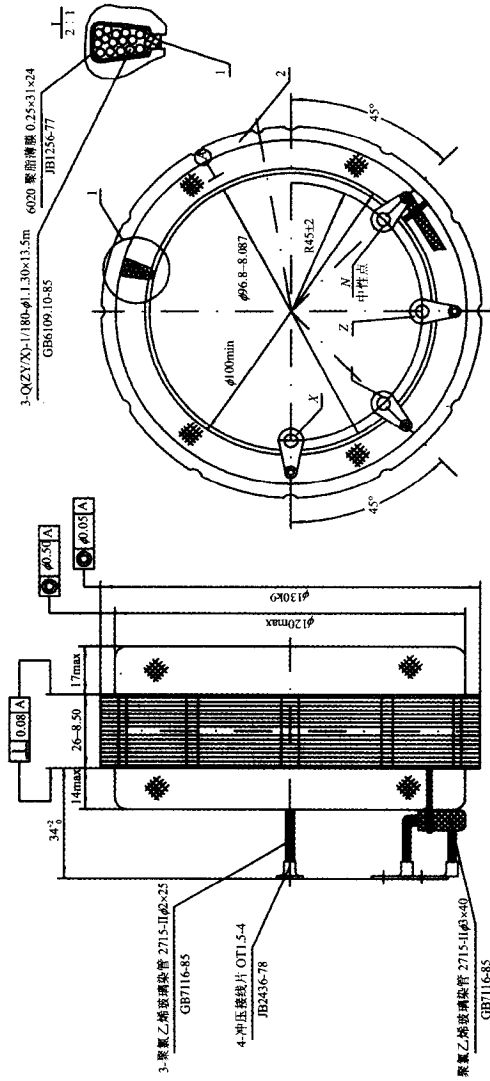


图 1-6 定子结构图

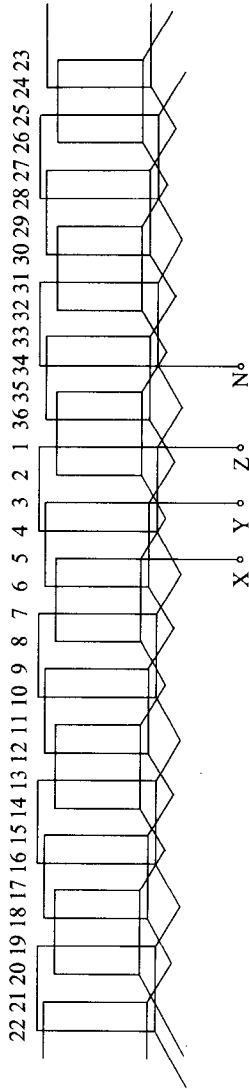


图 1-7 绕组绕制图

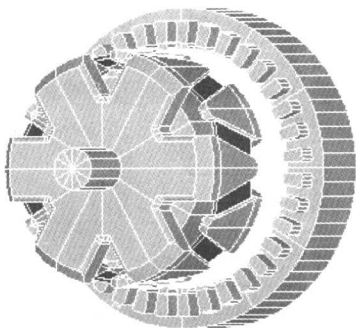


图 1-8 混合励磁爪极发电机结构

## 二、汽车用无刷爪极发电机

汽车用无刷爪极发电机有永磁无刷爪极发电机、电励磁无刷爪极发电机和混合励磁无刷爪极发电机几种，这里只介绍电励磁无刷爪极发电机。

汽车用电励磁无刷爪极发电机有两种：一是悬臂爪极式无刷交流发电机；二是励磁线圈通过星形支架固定在定子上的无刷爪极发电机。

### 1. 悬臂爪极式无刷交流发电机

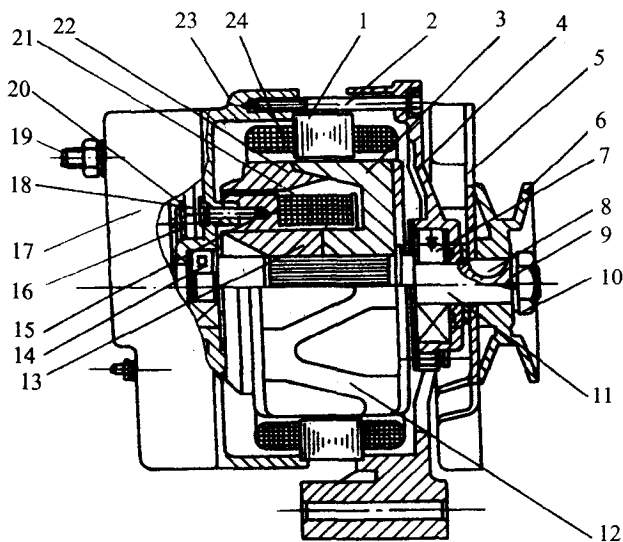
图 1-9 为 JFW14X 型悬臂爪极式无刷交流发电机的解体图。该机由定子、转子、前后端盖、风扇和皮带轮等组成，没有电刷滑环装置，定子由定子铁心和三相电枢绕组组成。转子为悬臂爪极式，转子极数为 12。磁场线圈绕在导磁的线圈支架上，该支架通过三个螺钉可安装在前端盖的内侧上，硅整流器安装在前端盖的外侧。



图 1-9 JFW14X 型悬臂爪极式无刷交流发电机解体图



图 1-10 所示为一种 14V、72A 悬臂爪极式内装电压调节器的无刷交流发电机结构剖视图，由定子、转子、前后端盖、风扇和皮带轮等组成，硅整流器和集成电路调节器被安装在后盖外侧，励磁线圈绕在可导磁的线圈支架上，然后该支架被三个螺钉固定在后盖的内侧。定子由三相电枢绕组和定子铁心所组成。悬臂爪极式转子由悬臂爪形磁极（由前后爪极焊接而成）、导磁铁心以及轴等组成，转子极数为 12，转子一端由后盖轴承座内的轴承支撑，另一端由前盖轴承座内的轴承支撑。转子轴的驱动端带有风扇和皮带轮，其通过半圆键用螺母和弹簧垫圈固定。



- 1-定子铁心 2-对撬螺栓 3-前爪极 4-前端盖 5-风扇 6-皮带轮  
 7-前轴承 8-半月键 9-弹簧垫圈 10-螺母 11-轴 12-铜焊 13-导磁铁心  
 14-后轴承 15-线圈支架 16-硅元件 17-罩壳 18-螺栓 19-输出接线柱  
 20-电子调节器 21-励磁线圈 22-后爪极 23-后端盖 24-三相电枢绕组

图 1-10 悬臂爪极式无刷交流发电机结构剖视图