

节能EV技术专辑



第 07 辑



电动汽车

〔日〕晶体管技术编辑部 编 EV编辑部 译

自制方程式EV

专题

- 电气系统设计
- 转矩引导系统的巨大作用
- 制作改装EV(原理篇)
- 将ICV改装为EV
- 制作多电芯串联锂离子电池的保护电路
- 驱动电池系统的构建与安全对策

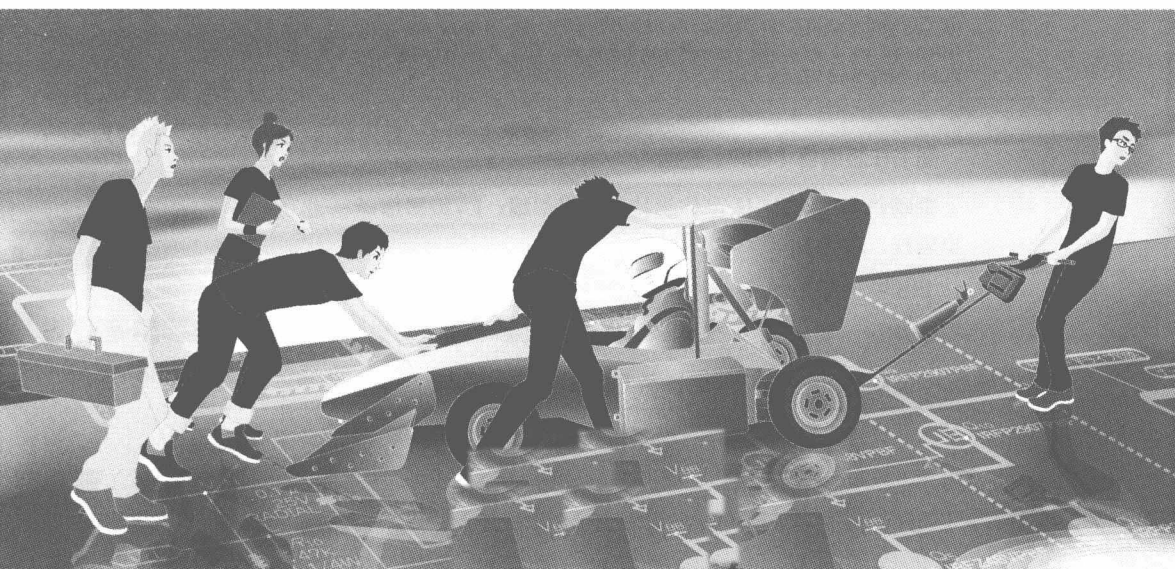


科学出版社

第 07 辑

电动汽车

〔日〕晶体管技术编辑部 编
EV编辑部 译



科学出版社

北 京

图字：01-2018-4471号

内 容 简 介

本书是《电动汽车》技术专辑的第7辑，主题是自制方程式EV，主要内容
包括电气系统设计、转矩引导系统的作用、EV可靠性的重要作用、改装EV的
原理和改装实例、多电芯串联锂离子电池保护电路的制作、驱动电池系统的
构建与安全对策、团队协作制作EV。

本书可用于本科、高职高专院校的电机、电子、汽车相关专业的教学，
也可用作电动车行业的入职培训，以及创客、创新比赛的参考用书。

MOTOR エレクトロニクス/MOTOR Electronics No.7
Copyright © 2017/2018 by CQ Publishing all rights reserved.
“MOTOR エレクトロニクス” (MOTOR ELECTRONICS) is Registered Trademark
of CQ publishing (at Japan Patent Office) . Its use in the title of this book is
licensed by a special agreement between CQ Publishing and China Science
Publishing and Media Ltd.

图书在版编目（CIP）数据

电动汽车.第7辑/(日)晶体管技术编辑部编；EV编辑部译.—北京：科学
出版社，2019.1

ISBN 978-7-03-059607-9

I.电… II.①晶… ②E… III.电动汽车—研究 IV.U469.72

中国版本图书馆CIP数据核字（2018）第261629号

责任编辑：杨 凯 潘玉卿 / 责任制作：魏 谨
责任印制：张克忠 / 封面设计：MATHRAX 张 凌
北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

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>

天津市新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年1月第 一 版 开本：787 × 1092 1/16

2019年1月第一次印刷 印张：8 1/2

字数：270 000

定价：58.00元

（如有印装质量问题，我社负责调换）

目 录

专题 自制方程式EV

电气系统设计	001
——以故障检测和安全措施为中心	
转矩引导系统的巨大作用	009
——2016年全日本大学生方程式大赛EV级别赛冠军	
凭借可靠性获得亚军	027
——以市售车辆为参考	

制作

制作改装EV(原理篇)	054
——为了达到目标性能而进行的基础学习	
将ICV改装为EV	077
——以理论为基础的控制系统设计	

解说

制作多电芯串联锂离子电池的保护电路	100
——BMS的原理及其必要性	

连载

驱动电池系统的构建与安全对策	111
团队协作制作EV	124
——学生EV团队制作	



电气系统设计

——以故障检测和安全措施为中心

[日] 鸭野亚王 执笔 | 陈 讷 译

从下一篇文章开始，本辑将刊载 2016 年全日本大学生方程式大赛 EV（电动汽车）级别赛中成绩优秀的团队撰写的制作报告。而在此之前，本文将介绍 EV 的电气系统设计。大赛出于对安全因素的考量，在技术上有非常细致的规定。在此，本文将介绍其相关背景、意义以及示例方案。

（编者按）

自 2013 年起，全日本大学生方程式大赛^①分为两个级别。ICV（燃油车）级别以汽油供能，搭载发动机；EV 级别以电池供能，搭载电机。

大赛包含赛道驾驶赛，但并非 F1 那种以首先夺得方格旗为优胜的竞技模式。大赛采用综合评估体系，评估依据包括 3 项静态项目审查和 5 项动态项目审查，见表 1。

● 准备参加项目审查的团队

首先，各参赛团队需要明确赛车的设计思路、目标性能等，进而制定面向大赛的计划。之后，还要在参赛前反复进行符合车检 / 大赛规定的设计、试制、评估，从而将赛车真正塑造成型（图 1）。

在此期间，EV 级别赛的参赛团队需准备的审查文档，除等效结构计算书、碰撞衰减器设计规格表、设计报告、商业规划等与 ICV 级别赛相同的资料外，还需要拟定 FMEA（故障模式与影响分析）、ESF（电气

方程式 EV 大赛审查文档

● 学生方程式比赛概况

学生方程式比赛的风潮，以欧美为中心，席卷世界各国，日本也于 2003 年第一次举办了全日本大学生方程式大赛。此后，每年 9 月，大赛在静冈县小笠山综合运动公园体育场举行。

表 1 大学生方程式大赛审查

项 目		计分（共 1000 分）	简要说明
静态审查	成本分析	100	赛车的制作、生产的成本
	营销报告	75	赛车的商业规划，判定其营销能力
	赛车设计	150	赛车的合理性、创新性、可改良性、可维护性、工艺性等
动态审查	加 速	75	0-75m 加速性能
	防 滑	50	8 字赛道转弯性能
	越 野	150	包含直道、弯道、蛇形穿桩、障碍道等的复合赛道上的性能
	耐 力	300	包含直道、弯道、蛇形穿桩、障碍道等的环形赛道上的耐力
	效 率	100	耐力审查中的耗油 / 耗电

① 全日本大学生方程式大赛仅限年满 18 周岁的高专生、短大生、本科生、研究生，以及同等水平的教育、训练机构学生参加。另外，赛前 7 个月内毕业生同样拥有参赛资格。

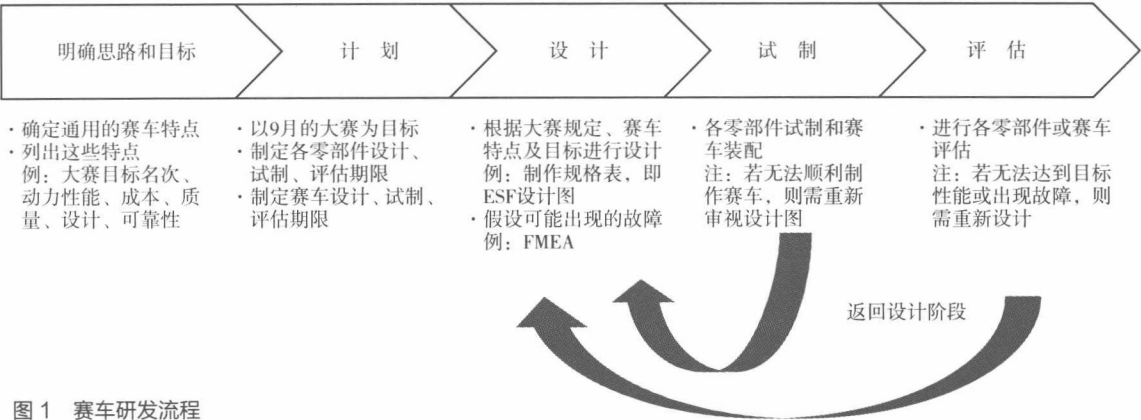


图 1 赛车研发流程

系统表格）、充电标准说明书、充电异常处理说明书等文档。

文档不齐全会被扣分,甚至无法参加项目审查。因此,参赛团队不仅需要制作赛车,还应认真完成上述文档。

● EV 级别需提交较多文档

笔者长期从事车辆制作,不断探索优化车辆动力性能和降低能耗的方法。但在此之前,需考虑设计、研发工作过程中可能会出现失控、火灾、触电等重大事故,并制定安全措施,防患于未然。

EV 级别比 ICV 级别多提交的 4 份文档,也正是举办方为避免使用高压的 EV 出现特有的故障而制订的安全标准。

接下来笔者将就赛车设计要点、安全性、可靠性等内容进行说明。

涉及的应用场景也异常多样,从几乎不使用到严苛环境下的驾驶均有可能,因此,车辆必然会以一定的频率发生故障。而且,故障发生的频率大致遵循上述故障产生模型。

大学生方程式赛车与市售车完全不同,大部分时间出现在赛场的方程式赛车仍处于研发阶段。当然,这些赛车虽然在学校(或工厂)能够顺利行驶,但换到实际路面或环境不同的赛场时,突然无法起动的状况时有发生。此外,为了通过车检,接触机械部分或电路部分引起的细微故障导致车辆无法起动的情况也常常发生。

● 初期故障

在研发阶段,许多设计和制作中的缺陷都很难发觉,持续行驶能够使缺陷暴露出来。大多数初期故障可以此方法检测。

除 9 月的全日本大学生方程式大赛外,赛车还有必要参加 8 月举行的试车会,同时,持续在环线、学校内部等行驶。

车辆的可靠性

● 防止车辆损坏

关于的车辆耐久性,各车辆制造商均设置了使用年限、行驶里程、故障发生率等指标,以防止长期使用而发生故障和性能劣化。为满足耐久性,各制造商亦单独设立了设计和评估标准,并据此进行研发中车辆的行驶耐久测试。

● 故障必然发生

图 2 所示为车辆开发时的典型故障产生模型。车辆系统十分复杂(机械结构、电子电路、软件三者复合),

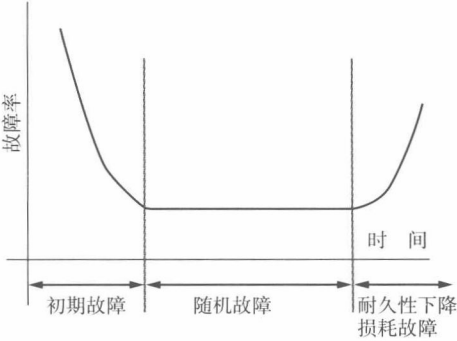


图 2 故障产生模型
由于曲线形似浴盆,故也称浴盆曲线

不断重复故障产生与处理的过程，故障就会逐渐减少。这也意味着参赛团队需要不断试驾，找出故障及其解决方法。

● 随机故障

进入随机故障期，产生的故障变得极少。可靠性达到这种程度足以跑完比赛全程。而耐久性下降、损耗故障期的故障，则是因车辆长期使用导致的劣化、零件损耗而产生的，在方程式 EV 中的必要性较低。

● 赛车劣化

对于小部分改装赛车或部分零件多次使用的赛车，参赛队伍有必要整理回顾车辆从开始至今的使用履历。电子元器件，需要注意连接器等反复插拔导致的接触电阻变化（劣化）并加以管理。

● 大赛连日高温

普通车辆会行驶于 40℃ 以上或 -30℃ 以下的恶劣环境，有些甚至还需要在海拔四千多米的山区行驶。不仅如此，雨天等高湿度环境、鹅卵石和砾石路面引起的震动，都是车辆必须应对的。

方程式 EV 的可耐受环境也需要提前确认。

于 2016 年 9 月上旬举办的学生方程式大赛正好赶上连日 30℃ 以上的高温天气，见表 2。参赛团队需要考虑到各零部件将处于高温环境这一点，应选择耐热性优良的零件或设计冷却系统。

● 注意天气变化

2016 年大赛期间连日高温，但 9 月 8 日有雨，该

表 2 2016 年全日本大学生方程式大赛期间的天气

日 期	9 月 6 日	9 月 7 日	9 月 8 日	9 月 9 日	9 月 10 日
天 气	晴	晴	雨	晴	晴
最高温度	31.7℃	31.2℃	31.1℃	31.8℃	30.6℃
最低温度	24.7℃	23.9℃	25.1℃	22.8℃	21.0℃
湿 度	83%	71%	95%	47%	61%

表 3 EV 车检项目表摘录（Part EV2 第 5 项及第 6 项）

No	概 要	对应规则项目	详细确认方法
5	确认油门位置传感器失灵时的车辆安全性	EV 2.3.5 EV 2.3.6 EV 2.3.8	电机能否在失灵时停止 通过断开油门位置传感器的连接器进行确认
6	确认刹车传感器失灵时的车辆安全性	EV 2.4.3 EV 2.4.4	电机能否在失灵时停止 通过断开刹车传感器的连接器进行确认

日还进行了加速、防滑和越野审查，见表 2。

参赛团队需要做好应对雨天的措施，如驾驶员要更加细心专注地驾驶车辆、预先准备雨胎等。另外，EV 车检的雨天测试项目要求赛车必须能在浸水情况下启动系统并顺利行驶。

因此，参赛团队必须做好各类电气部件和连接器的防水措施。

故障检测与安全措施

● 车辆损坏时

设计车辆时需要考虑其可维护性，以便发生故障后能够尽快在修理厂检测维修。方程式 EV 也是如此，尤其要注意线束（接线）设计。

在大学生方程式大赛中，EV 车检项目 Part EV2 的第 5 项为确认油门位置传感器失灵时的车辆安全性，第 6 项为确认刹车传感器失灵时的车辆安全性（表 3）。在 EV 车检中，还有要求断开连接器或移除某些零件的项目（模拟行驶中断路）。

由于包裹绝缘管的线束很难处理，参赛团队需要优化布局设计。当然，相较于应付车检采取措施，笔者更希望参赛团队能够切实站在车辆行驶角度，认真考虑车辆的可保养性和可维护性。

● 车辆故障检测

传统 ICV 具备较多机械结构，驾驶员可以依靠感官找出故障并应对。例如，驾驶员看到烟雾从发动机盖内部冒出，即可察觉发动机内部异常，停车并远离车辆，抑或驾驶员操作方向盘时感觉传至手部的触感发生变化，明白车辆的驱动系统出现了问题，于是停车等。

然而，近年来车辆已经变为使用电子控制并高度电气化的复杂系统，电气故障很难直观发现，因此驾驶员难以察觉到车辆的异常。

车辆法规重点指出，电子控制系统需要在车辆出现异常时对故障点和故障内容进行自我诊断，燃油车需要搭载 OBD（On Board Diagnosis，车载诊断系统）进行故障安全防护，避免尾气排放恶化。

● 方程式 EV 的故障应对策略

方程式 EV 使用 FMEA 列出系统潜在故障因素、分析故障影响，进行车辆故障检测和安全性探讨。

作为大赛的审查资料，FMEA 项目表共列举了 108 项故障模式，每一项都必须进行评估。

当然，除了这些项目，各参赛团队也应列出自身设计的零部件中存在的不足。

● 相关安全性评估指标

严重度、故障频度、检测度是方程式 EV 设计过程中的安全性评估指标。

（1）严重度

用来评价车辆和驾驶员可能遇到的故障的严重度。例如，车辆发生火灾、驾驶员触电、车辆失控等情况严重度较高，而信号输入不稳定、系统无法启动、车辆无法行驶等严重度较低。

严重度、故障频度和检测度的评估级别见表 4。

（2）故障频度

用来评价故障发生的可能性。如学生方程式大赛在高温天气下举办，零部件受高温影响，故障的频度较高，而在 -30℃ 等低温环境下，零部件冻坏、故障的频度也会较高。

（3）检测度

用来评价对异常、故障的可检测性。故障发生时，检测度高的车辆能够亮起仪表盘警告灯、响起蜂鸣音

等，就可以使驾驶员迅速察觉。但如果检测度较低，车辆就无法使驾驶员察觉异常。

● FMEA 项目表说明

在 2016 年全日本大学生方程式大赛中，FMEA 项目表的第 14 ~ 30 个项目（转矩编码器故障、预充电和放电电路故障、AIR 故障）被选为审查项目。

笔者将以第 15 项转矩编码器（油门位置传感器）故障为例，对 FMEA 进行说明。

EV 系统根据油门位置传感器输出电压（油门开度 0% ~ 100% 对应输出电压 0 ~ 5V）调整电机转矩，从而使车辆行驶（图 3）。

操作控制器中有 2 个油门位置传感器，当传感器输出偏差过大时，系统即可检测到异常（表 5）。

2 个传感器同时断路时，控制器将被施加 5V 电压，从而误判定油门输入了最大指令，致使车辆失控。严重度见表 5，这是一个致命缺陷，评级高达 5 级，需要进行改进。

● 加入安全防护

如前所述，将评级很高的致命缺陷变得安全的设计称为故障安全防护设计。团队为了保证安全性将会修改设计，例如将油门开度 0% ~ 100% 对应的传感器电压输出值定为 0.5 ~ 4.5V（图 4）。

油门开度对应的输出不会脱离 0.5 ~ 4.5V 的范围。在断路或短路时，控制器被施加 0V 或 5V 的电压，可以立刻检测异常并停车。由于车辆系统不再运转，严重度从 5 级降为 1 级（表 6）。因为改进后的系统可以发现并检测故障，检测度也从 4 级降为 1 级。

参赛团队应遵循上述过程，对初步设计的零部件进行严重度、故障频度和检测度的评级，对风险较高的故障模式尝试加入故障安全防护设计，然后再次使用 FMEA 项目表进行评估。

表 4 FMEA 项目表评价级别

等 级	严 重 度	故 障 频 度	检 测 度
1	故障可能不造成损伤，但影响整体安全性	极 低	可明确检测
2	故障可能导致轻度损伤	较 低	较高检测可能
3	故障可能导致中度损伤	偶尔发生	中等检测可能
4	故障可能导致严重损伤	频繁发生	较低检测可能
5	故障可能导致致命损伤	持续发生	无法被检测

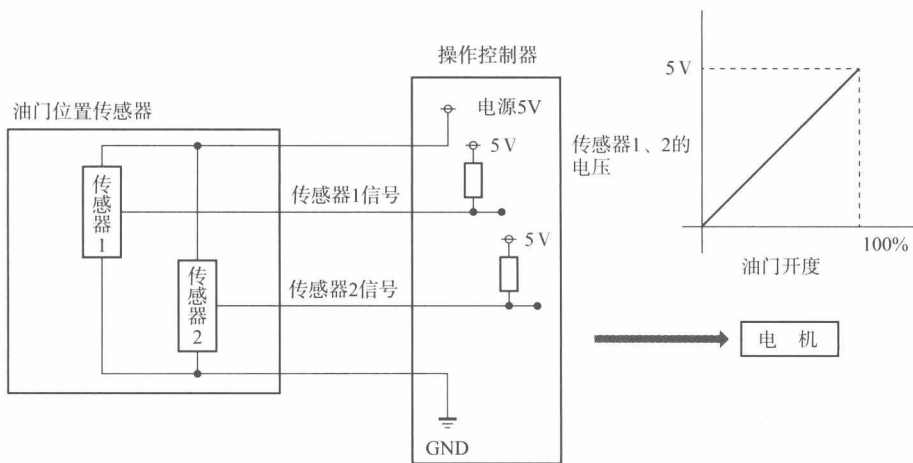


图 3 油门位置传感器系统——改进前

表 5 FMEA 项目表 No.15（改进前）

FMEA No.	组 件	功 能	故障模式	故障原因	故障影响	
					局 部	整 体
15	转矩编码器	油门位置信号	油门位置传感器 1、2 的输出值不匹配	接线断路 接线短路 接线错误、传感器信号紊乱	油门位置传感器信号输入不稳定 油门位置传感器信号误输入	车辆不受控制地加、减速

严重度级别	严重度推理	故障频度级别	故障频度推理	故障检测	检测度级别	检测度推理	风险级别	故障处理 - 车辆	故障处理 - 团队
5	当油门位置传感器的 2 根接线均断路时，控制器被施加 5V 电压，车辆失控。由于可能产生致命损伤，因此严重度评为 5 级	2	加工失误导致接线的品质不佳。由于可用 ESF 项目表或设计图进行管理，因此故障频度评为 2 级	微控制器诊断，发现异常时点亮警告灯。	4	微控制器可检测到传感器 1 和传感器 2 的偏差变大，从而发现异常→停止系统→点亮警告灯。然而，系统无法检测 2 个传感器同时断路的情况。由于无法检测部分故障，因此检测度评为 4 级	$40 = 5 \times 2 \times 4$	微控制器检测到异常，停止电机输出并点亮警告灯提示驾驶员	驾驶员通过观察警告灯察觉异常，按下停车按钮。团队确认警告灯检查故障点

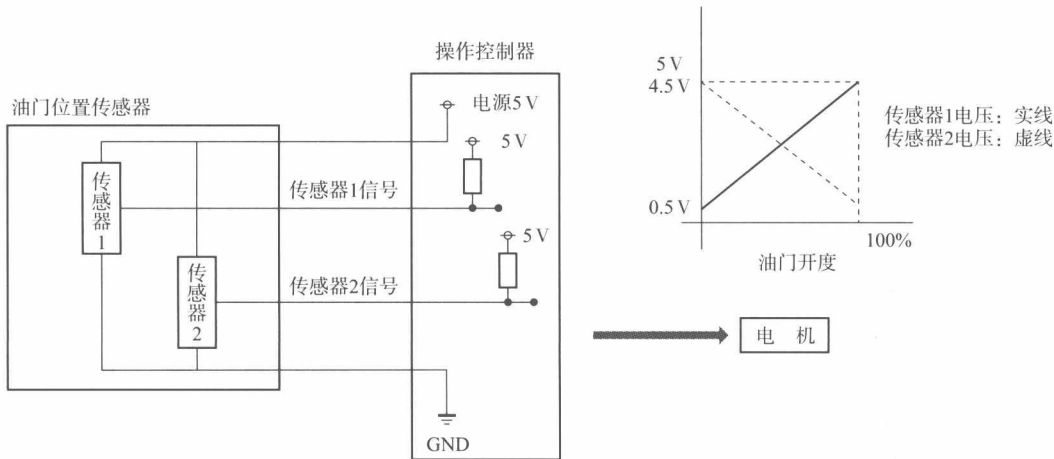


图 4 油门位置传感器系统——改进后

表 6 FMEA 项目表 No15（改进后）

FMEA No.	组 件	功 能	故障模式	故障原因	故障影响	
					局 部	整 体
15	转矩编码器	油门位置信号	油门位置传感器 1、2 的输出值不匹配	接线断路 接线短路 接线、传感器信号紊乱	油门位置传感器信号输入不稳定 油门位置传感器信号误输入	车辆不受控制地加速、减速

严重度级别	严重度推理	故障频度级别	故障频度推理	故障检测	检测度级别	检测度推理	风险级别	故障处理 - 车辆	故障处理 - 团队
1	当油门位置传感器的 2 根接线均断路时，5V 电压加载至操作控制器，系统检测到断路并停车。由于系统不再活动，因此评为 1 级	2	加工失误导致接线的品质不佳。由于可用 ESF 项目表或设计图进行管理，因此评为 2 级	微控制器诊断，发现异常时点亮警告灯	1	微控制器可检测到传感器 1 和传感器 2 的偏差变大，从而发现异常。另外，连同 2 个传感器均断路的情况在内，电路方面的异常均可诊断，因此评为 1 级	$2 = 1 \times 2 \times 1$	微控制器检测到异常，停止电机输出并点亮警告灯提示驾驶员	驾驶员通过警告灯察觉异常，按下停车按钮。团队确认警告灯显示并检查故障点

赛车系统设计

● 车辆控制功能的分配

EV 配有电机、电池、空调、刹车、方向盘等的控制器，各控制器之间相互通信、协调控制。

学生方程式 EV 的控制器由驾驶员操作的驱动控制器（电机控制器）和管理电池、能源的电源控制器（AMS）组成（图 5）。

另外，控制器内应附有安全故障防护功能以确保控制系统的安全性。

● 油门开度与电机转矩的额外调节

接下来，笔者将介绍油门开度和管理电机转矩的驱动控制的相关内容。车辆通常具有电机转矩指令值

随油门开度增大而成比例增大的特性（图 6）。

赛车采用了线控系统（By-Wire System，使用电信号控制机械活动的系统）。为了使方程式 EV 在动态审查中胜出，需要将驾驶员的可操作性考虑在内，研究额外的调节方式。

2016 年越野审查（图 7）平均车速为 40 ~ 48km/h。虽说赛车各不相同，但如果驾驶员频繁使用平均车速附近，即 25% ~ 50% 范围内的转矩指令值，那么转矩指令值随油门开度变化比例增大的系统（图 6）加速过程很短，会使驾驶员感觉难以操作。

对系统做出图 8 所示的改进，用 25% ~ 75% 的油门开度对应 25% ~ 50% 的转矩指令值。改进后，加速操作引起的转矩变化相对平缓，驾驶员可以更加细致地进行加速操作。

而在操作性方面，赛车需要持续行驶，并应与驾驶员的喜好相符。

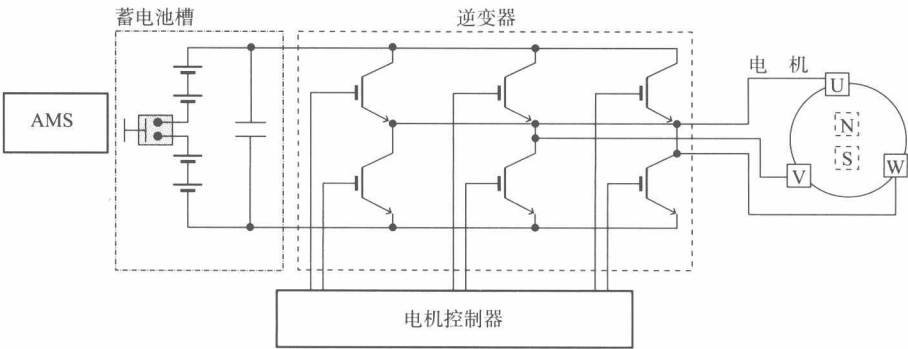


图 5 方程式 EV 控制功能的分配

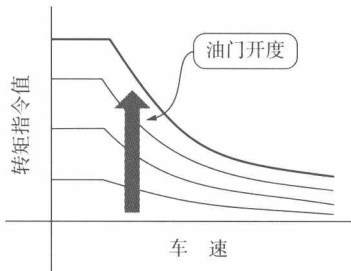


图6 油门开度 - 电机转矩指令值特性

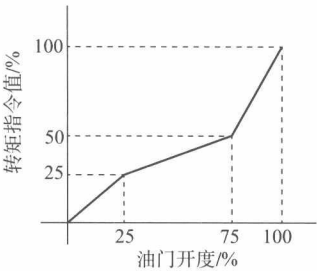
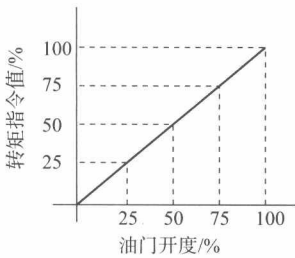
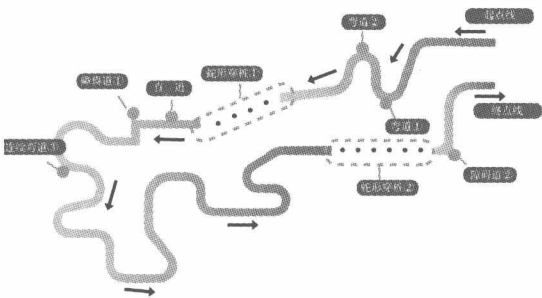


图8 油门开度 - 电机转矩指令值特性改进方案举例

如果电池需要持续处于高温，参赛团队就必须商讨出有效的冷却方法。

- 越野
赛道概览
- 1圈约800m的复合赛道(直道、弯道、蛇形穿桩、障碍道等)
 - 赛道宽度4.5 ~ 5m
 - 最高速度约105km/h
 - 平均速度为40 ~ 48km/h



- ★此800m左右的赛道由直道、弯道、蛇形穿桩、障碍道等赛道组成，用来测试赛车的操作性能。
 - ★在蛇形穿桩部分，赛车需要在许多标杆间穿行，需要谨慎驾驶。
- 注：赛道每年都有些许改变

图7 2016年越野赛道

● 注意电池的温度管理

以电机作为动力源的方程式EV，是将电能储蓄在电池内，依靠电池行驶的车辆。因此，不仅需要将电池调整至最佳工作状态，还必须管理电池模块中每个电芯的电压和温度，并配备管理电池充放电的AMS(蓄能管理系统)。

在低温或高温环境中，电池无法发挥其原有的性能，输出受到了限制。

在酷暑中举办的全日本大学生方程式大赛更是如此，参赛团队必须预先考虑赛车在高温环境下的使用情况。大赛规则EV3.6.3也要求电池的管理温度低于60℃(表2)。

如图9所示，当电芯温度变高时，其内部的化学反应加剧，容量显著下降，因此需要设置电池的使用温度范围。参赛队伍需要参照大赛规定的电池上限温度(60℃)，以充分满足大赛高温环境为目标进行设计。

ESF

参加大学生方程式大赛EV级别赛的学生，并不能任意制作车辆。学生需要将自己当成(虚拟的)车辆投资企业中的一员，考虑方程式EV的研发和出售等问题。因此，在赛车的研发过程中需要采用具有可生产性、可维护性和安全性的设计。大赛也规定参赛团队需要制订ESF(Electrical System Form, 电气系统表格)，记录每个必要的电气相关项目的设计思路和规格表、接线以及连接器的规格、零部件在赛车上的安装位置等。

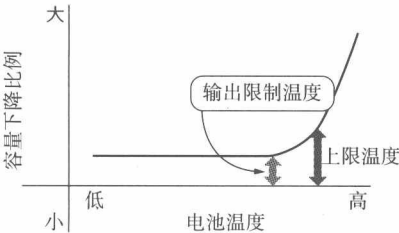


图9 电池温度与容量下降比例之间的关系

ESF 汇总了项目设计方法、上述的控制系统和参照 FMEA 的故障安全防护设计见表 7。

由于大赛当天的 EV 车检需要通过实物和 ESF 项

目表确认赛车是否符合规定，因此认真制作 ESF 很有必要。

表 7 ESF 项目表登记项目概要

项 目	概 要
1 系统综述	赛车思路和赛车概要
2.1 停车控制电路	停车控制电路概要
2.2 绝缘检测装置（IMD）	监测高压电路和外部绝缘电阻 响应超过 500Ω/V 的电阻并停车的系统
2.3 延时开关	响应因车辆撞击产生的 6g ~ 11g 的加速度并停车
2.4 制动可靠性装置	猛踩刹车、电池输出功率超过 5kW 时停车的系统
2.5 IMD 和 BMS 的重置或关闭	记载绝缘检测装置（IMD）、电池控制器（BMS）等系统的异常检测和重置方法
2.6 停车联锁系统	HVD 的联锁系统 （也需搭载轮毂式 EV 因脱落产生的联锁系统）
2.7 驱动系统激活指示灯	当电池模块外电压达到 DC 60V 以上时，指示灯以 2 ~ 5Hz 的频率闪烁
2.8 测量点	确认高压输入电压的测量点 （确认限流电阻）
2.9 预充电电路	通过预充电继电器控制充电，直至达到电池电压的 90% 以上
2.10 放电电路	关闭系统后 5s 内，电压可低于 DC 60V（AC 25V）
2.11 高压断路器	物理隔断电池两端至少一端的装置
3 蓄电池	确认电池的规格 （准备装配图和照片）
4 能量计安装	确认能量计安装位置 （在网站主页上确认能量计尺寸信息）
5 电机控制器	记录电机控制器的规格和安装位置
6 电 机	记录电机规格和输出特性
7 转矩编码器	记录转矩编码器系统规格
8 干预驱动系统的额外低压部分	记录 GLV 系统（低压）
9 综合接地概念	距驱动系统、GLV 部件 100mm 以内存在的导电零件接地点 （在 EV 车检 Part EV1.28 中确认接地点）
10 防火墙	确认防火墙材料（发动机侧：铝材；驾驶员侧：绝缘材料）

笔者介绍

鸭野亚王



SUBARU 株式会社 电气单元研究实验室

曾从事发动机和车辆研发。参与 EV 研发后，震惊于 EV 的加速性能，并深深着迷于其优越的驾驶性能，因此至今仍在从事这项工作。

自 2015 年起担任全日本大学生方程式大赛 EVWG 委员，致力于帮助更多赛车跑完全程。

转矩引导系统的巨大作用

——2016年全日本大学生方程式大赛EV级别赛冠军

〔日〕菊地俊行 佐藤洸太 执笔 | 陈 讷 译

2016年全日本大学生方程式大赛EV级别赛的优胜团队采用了转矩引导系统。作为大赛主体的22km竞赛设置了诸多弯道与蛇形穿桩路段，转矩引导系统在这样的赛道上发挥了极大的作用。

（编者按）

引 言

每年9月，为期5天的全日本大学生方程式大赛

会在静冈县小笠山综合运动公园体育场举办。学生们花费一整年的时间进行方程式赛车的设计和制作，比拼在车辆制作方面的综合实力。

岩手联合大学生方程式团队（SIFT）开发了搭载转矩引导系统的EV，并以此向大学生方程式大赛EV级别赛发起了挑战。团队于第13届大赛（2015年）初次参赛，并于第14届大赛（2016年）获得了EV综合优胜奖（EV级别赛第1名）（图1）。

接下来，笔者将介绍团队从2014年组建开始到2016年大赛为止两年的开发历程，期间也会对转矩引导系统技术和EV开发过程中的问题进行说明。



图1 2016年SIFT（一关工业高等专科学校、岩手大学和岩手县立大学联合）团队集体照

团队组建与赛车制作计划

● 岩手联合大学生方程式团队 SIFT

SIFT (Student of Iwate Formula Team) 是岩手县一关工业高等专科学校、岩手大学和岩手县立大学三所学校于 2014 年组建的联合团队 (图 2)。



图 2 岩手联合大学生方程式团队 SIFT

● 期望制作运动性能优越的 EV

大学生方程式大赛通过静态审查 (资料审查与静止状态下的车检) 和动态项目审查 (行车审查) 对参赛车辆进行综合评价。而最能展现赛车风采的,无疑是可以在赛道上展现行驶姿态的动态审查项目。动态审查共有 4 个审查项目,实际赛道如图 3 所示,相比最高速度,动态审查对加速性能和转弯性能的要求更高。

电机在低转速时能够发挥出色的转矩特性,擅长加速。不仅如此,一辆赛车还可以安装多个电机。独立控制前后左右轮,进而实现车辆运动控制或转矩引导等。

一关工业高等专科学校曾研究过 EV 转矩引导系统,于是决定在赛车上搭载这一装置,以期开发出运动性能优越的 EV。

● 转矩引导系统的引入

大学生方程式大赛的成绩主要取决于加速性能和转弯性能。因此笔者的团队引入了提高赛车运动性能的转矩引导系统,不用过度依赖驾驶员的技术也能顺利通过蛇形穿桩。

■ 转矩引导系统的效果

● 改变车辆行驶方向的转向系统

车辆具有能够改变前进方向的转向系统,通常依靠转动方向盘来改变车轮方向。质量较大的车辆低速行驶时,驾驶员需要用较大的力气打方向盘,因此车辆可能会使用动力转向,借助电机的动力转动方向盘。

● 分配驱动力改变行驶方向

转矩引导系统通过分配两侧车轮的驱动力 (转矩) 控制车辆行驶。分配给两侧车轮的驱动力存在差异,车辆就会在重心周围产生横摆力矩。通过控制横摆力矩可以提升车辆的运动性能和稳定性。

如果分配给右轮的驱动力比左轮的大,车辆就会向左侧转向。即使不使用方向盘改变车轮方向,也可以改变车辆的行进方向 (图 4)。

● TVD

车辆通过差速器将发动机的驱动力传递到左右轮。差速器是一种可以消除车辆转弯时左右轮转速、使转弯顺畅的装置。具有任意分配左右驱动力功能的差速器称为 TVD (Torque Vectoring Differential, 转矩引导差速器)。

目前,转矩引导系统以新技术的身份引起人们的热议,然而实际上,这一技术早在约 20 年前就已经在 ICV 中投入使用。为每个车轮分配合适的驱动力,车辆就可以更有效率地利用轮胎的摩擦力。

许多市售车都安装了 TVD (图 5),高性能车辆中,TVD 用来提升运动性能,普通车辆中,TVD 用来确保稳定性。

■ 转矩引导方案与 TDA 的使用

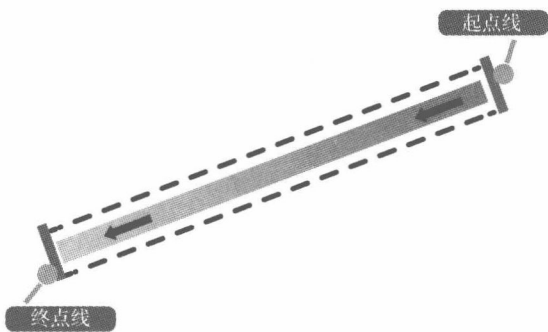
● EV 用 TVD 的 3 种类型

如今,出于对环境问题的担忧,HEV (混合动力汽车)、EV 等的开发正在积极进行。由于加入了电机驱动,TVD 的潜力被大大激发了出来。目前主要的 3 种 EV 用 TVD,包括左右独立型 TVD、转矩差附加型 TVD 和转矩差增幅型 TVD (图 6)。

(1) 左右独立型 TVD——IMD

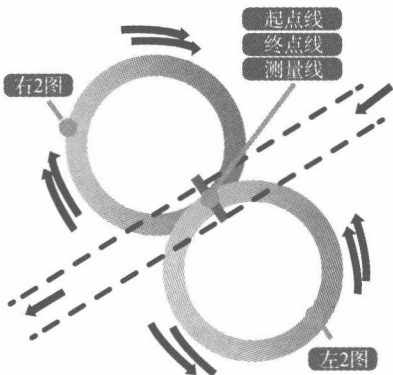
IMD 是一种通用方案,使用 2 个电机独立驱动左右轮。ICV 用 TVD 使用离合器传递转矩,因此会产生摩擦损耗,而 IMD 不需要离合器。在德国大学生方程

- 赛道概览
- 直线75m
 - 赛道宽度3m



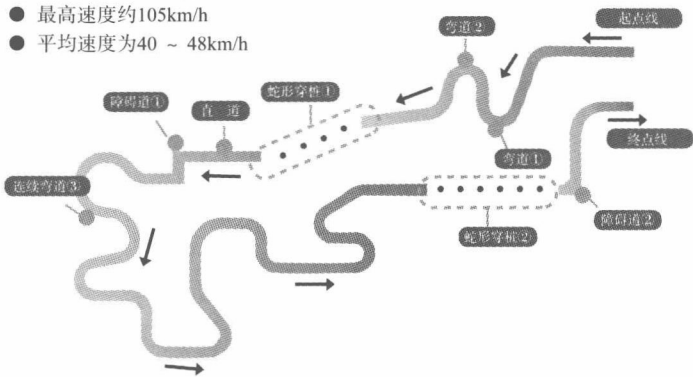
(a) 加速

- 赛道概览
- 8字赛道（左2圈，右2圈）
 - 赛道宽度3m



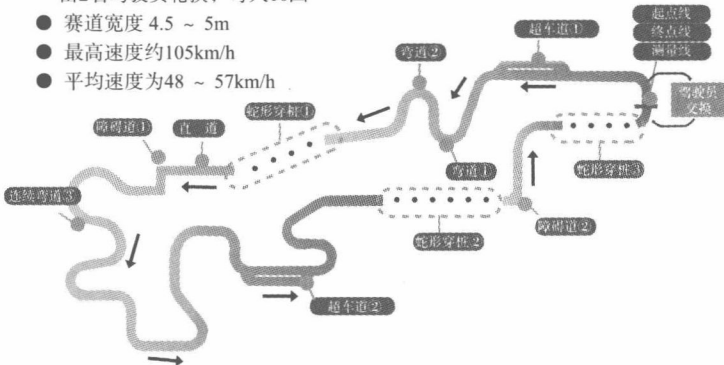
(b) 防滑

- 赛道概览
- 1圈约800m的复合赛道（直道、弯道、蛇形穿桩、障碍道等）
 - 赛道宽度4.5 ~ 5m
 - 最高速度约105km/h
 - 平均速度为40 ~ 48km/h



(c) 越野

- 赛道概览
- 1圈约1000m的复合赛道（直道、弯道、蛇形穿桩、障碍等），由2名驾驶员轮换，每人10圈
 - 赛道宽度 4.5 ~ 5m
 - 最高速度约105km/h
 - 平均速度为48 ~ 57km/h



(d) 耐力

图3 大学生方程式大赛赛道

其中，越野与耐力审查赛道每年会有些许变化，赛道布局上弯道比直道更多。因此，要想取得好成绩，不仅要求赛车的运动性能优越，对驾驶员的驾驶技术也有较高要求

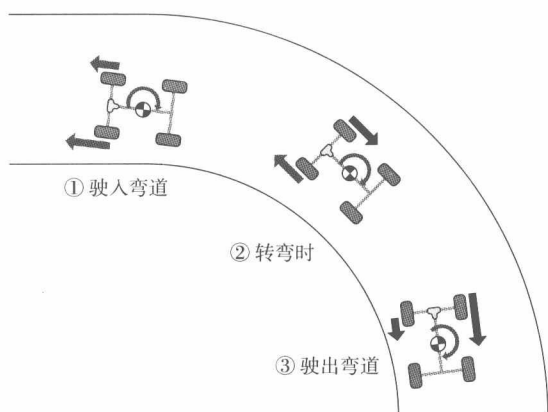


图4 转矩引导系统

① 驶入弯道时，车辆产生负转矩并减速，转矩被较多分配给左轮。

② 转弯时，车辆产生正转矩给右轮，产生负转矩给左轮。

③ 驶出弯道时，车辆产生正转矩并加速，转矩被较多分配给右轮。

式EV级别赛中，采用4个轮毂电机进行转矩引导已经成为主流。

(2) 转矩差附加型TVD——LTA

电机的转矩与电流成正比，与转速成反比，因此在车速较高时转矩较小。那么，在车辆高速行驶中，左右独立型TVD转矩引导系统发挥的作用较小。此时可以使用副电机产生转矩差，这种方案为转矩差附加型TVD。副电机的性能决定了产生横摆力矩的能力。

(3) 转矩差增幅型TVD——TDA

TDA是团队顾问泽瀚薰老师研究设计的新型方案。泽瀚薰老师是三菱汽车开发并商业化转矩引导设备——主动后桥转矩控制系统（AYC）的第一人。

转矩差增幅型TVD是一种通过增幅电机转矩差，产生更大转矩差的方案（图7，图8）。其内部存在2组行星齿轮结构（图9）。当电机转矩平均分配时，2组结构一体旋转，而当转矩不均衡分配时，此结构就通过传动轴传递转矩。设计者可通过不同的齿轮设计

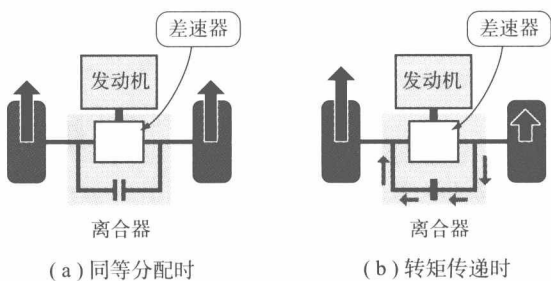


图5 TVD

灰色的装置即为TVD，ICV中，TVD由差速器（差动齿轮）和离合器构成，转矩同等分配时，与一般车辆的情况相同；在进行转矩引导时，离合器将转矩从一侧车轮向对侧传递

设置任意转矩差。

● 电机随方案的不同而改变

上述3种方案无法进行片面的评价，因为不同的方案对电机的要求也不同。

(1) IMD方案

左右独立型TVD结构简单，但如果电机无法在高速旋转状态下产生足够的转矩，这一方案的效果便差强人意。采用轮毂电机的车辆可以很容易实现此方案。

(2) LTA方案

转矩差附加型TVD方案由1个主电机驱动，1个副电机产生转矩差。即使在车辆高速行驶时，也能产生转矩差，但驱动电机必须拥有比其他方案更高的输出和转矩。此外，要产生足够大的转矩差，对副电机的性能要求也较高。

(3) TDA方案

转矩差附加型TVD可以通过行星齿轮结构，将电机的转矩差放大，对电机性能的要求不像其他方案一般严苛。另外，由于不需要大幅调节电机电流就可以实现功能，给电机和电池造成的负担较小，在电能利

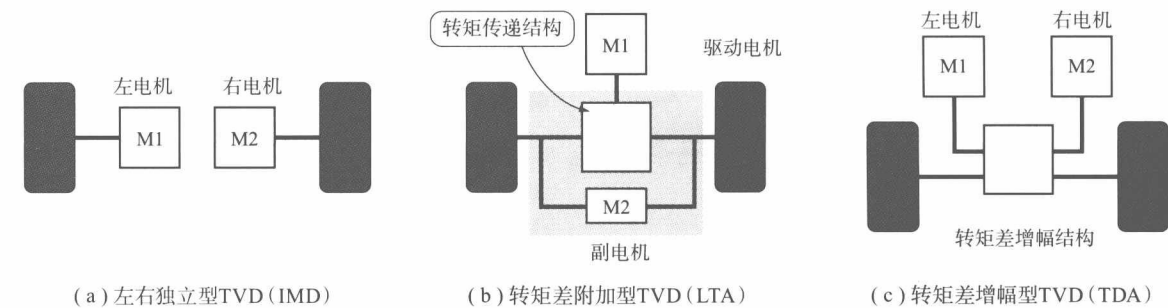


图6 EV用TVD的种类

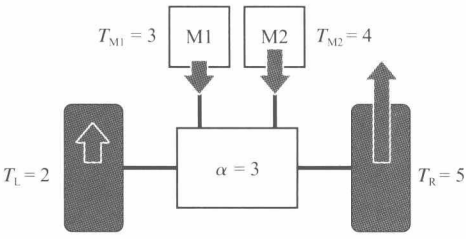


图 7 转矩差增幅型 TVD
行星齿轮的齿数决定了转矩差增幅系数 α ，产生的转矩差 ΔT 可以根据以下公式计算得出(图为 $\alpha = 3$ 时的情况)。
 $\Delta T = (T_R - T_L) = \alpha(T_{M2} - T_{M1})$

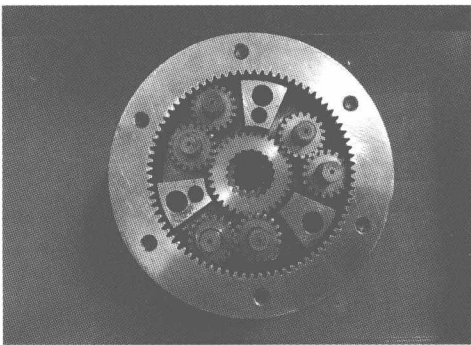


图 9 行星齿轮结构

用率方面也很有优势。不过，此方案需要考虑行星齿轮结构的质量。

● 驱动与横摆力矩产生能力的均衡

接下来笔者将对各方案的运动性能进行比较分析。
图 10 所示为总输出功率相同时的计算。图 11 中纵轴列出了总驱动 / 再生转矩，横轴列出了左右车轮之间的转矩差。图表在纵轴和横轴延伸得越长，则表明

车辆在行进方向和左右方向的运动性能越强。而图中曲线包围的面积越大，TVD 的均衡性越好。

图 11 (a) 和 (b) 分别是在车速 40km/h 和 120km/h 条件下计算的结果。

直线前进时 (转矩差 $\Delta T = 0$ ，纵轴)，以 90kW 功率驱动的 LTA，其驱动转矩比 2 个 50kW 驱动的方案小。然而，即使转矩差 ΔT 增大，LTA 也可以确保

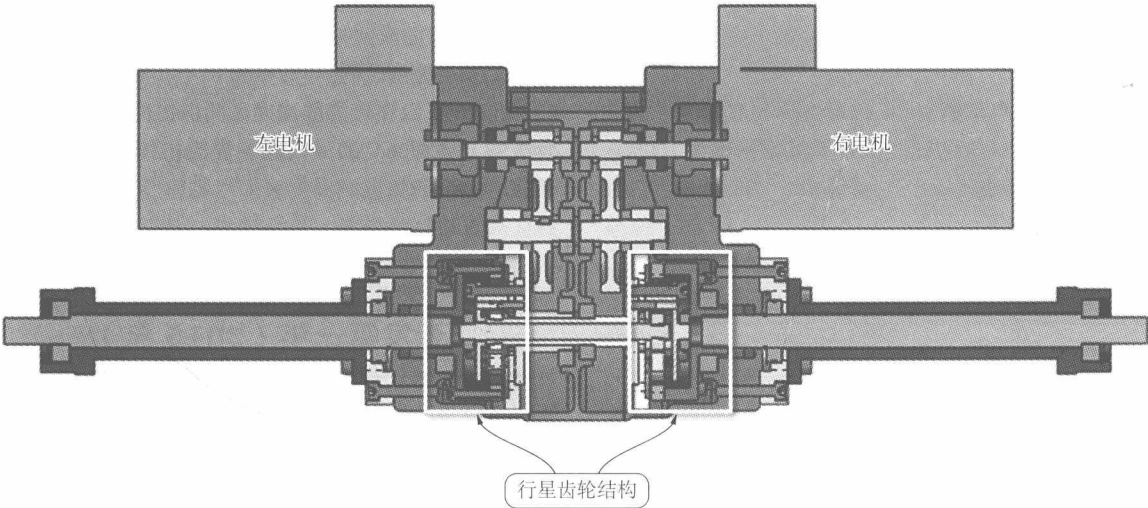


图 8 转矩差增幅型 TVD 的内部结构 (试制型)
2 组行星齿轮的太阳轮、行星架相互结合，传递转矩

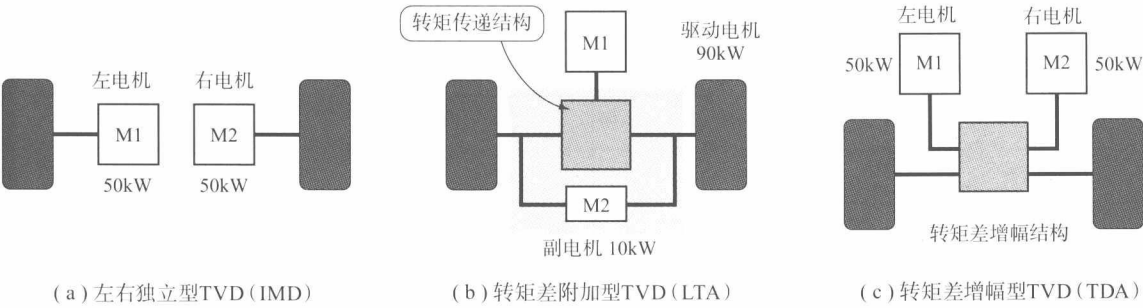


图 10 TDP^[11] (Torque Distribution Point, 转矩引导点) 分析条件