

自动调整原理

第三分册

苏联 B.B. 索洛多夫尼柯夫主編

机械工业出版社

自动調整原理

第三分册

苏联 B.B. 索洛多夫尼柯夫主編

王 众 託譯

水利电力出版社

內 容 提 要

自动調整原理(一、二、三分册)总结了自动調整理論的发展現狀,講述了綫性和非綫性自动調整系統的分析、計算和綜合的方法。

本分册包括原書第五、第六、第七、第八篇,講述非綫性自动調整系統理論的某些問題,自动調整系統中周期性工作情况的近似研究法,繼电型自动調整系統的分析法等。

本書可供科学研究工作者,高等学校动力、电工、仪器制造以及国防方面各有关专业的教师、研究生、高年級学生和技术人員閱讀参考用。

В.В.СОЛОДОВНИКОВ
**НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ НЕЛИНЕЙНЫХ
СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ**
МАШГИЗ МОСКВА 1954

自动調整原理 第三分册

根据苏联国立机器制造書籍出版社1954年莫斯科版翻譯

王 众 託譯

*

2049 D589

水利电力出版社出版(北京西郊科学路二里沟)

北京市书刊出版业营业許可証出字第105号

水利电力出版社印刷厂排印 新华書店发行

*

850×1168 $\frac{1}{2}$ 开本*11 $\frac{1}{2}$ 印張*317千字*定价(第10类)2.30元

1959年7月北京第1版

1959年7月北京第1次印刷(0001—5,780册)

目 录

第 二 部 分

非綫性自动調整系統理論的某些問題

第 五 篇

相空間的概念及其在解决某些非綫性調整 理論問題方面的应用

第二十六章 自动調整系統的典型非綫性特性..... 751

1. 自动調整系統的非綫性特性(751)
2. 自动調整系統典型的非綫性靜特性(754)
3. 自动調整系統的典型非綫性特性(760)
4. 失灵区(770)
5. 綫性区和非单值区(775)
6. 飽和区(777)
7. 表示任載伺服机特性的曲綫場(778)
8. 自动調整系統非綫性特性的实验測出方法(779)

第二十七章 非綫性自动調整系統的相迹 781

1. 相平面的概念(781)
2. 积分曲綫方程式和奇点的分类(786)
3. 自持振蕩和奇綫的分类(793)
4. 右边不可解析的方程式所描述的調整系統的相平面(797)
5. 多叶相曲面的概念(805)

第二十八章 考虑干摩擦和空隙时某些自动調整系統动特性 的分析..... 812

1. 感受元件中有干摩擦时使用恒速伺服机的調整系統的研究(813)
2. 使用恒速伺服机的調整系統在有空隙时的研究(821)
3. 使用恒速伺服机与繼电型裝置的調整系統的研究(822)
4. 当感受元件中有干摩擦时使用变速伺服机的調整系統(824)
5. 变速伺服机中有干摩擦时的調整系統(827)

第二十九章 应用逐点变換法来分析非綫性自动調整系統 834

1. 問題的提法(835)
2. 研究方法(835)
3. 最簡單的繼电型自动調整系統理論(843)

第三十章 非綫性伺服机构的鎮定..... 865

1. 問題的提出(867)
2. 伺服机构的运动方程式(869)
3. 繼电型控制

的伺服机构中反馈的镇定作用(873) 4. 伺服机构中速度反馈的镇定作用(880) 5. 加速度反馈的影响(885)

第三十一章 利用非线性反馈来改善自动调整系统的动特性..... 886

1. 全部最佳调整过程的求法(887) 2. 利用非线性反馈来实现最佳调整过程(896) 3. 使用抛物线特性非线性元件的系统的动特性(899) 4. 非线性反馈的应用举例(907)

第 六 篇

自动调整系统中周期性工作情况的近似研究法

第三十二章 自动调整理论中的小参量法 915

1. 小参量法的概貌(915) 2. B.B.布尔加柯夫法的应用(919) 3. 举例(923)

第三十三章 以谐波平衡原理为基础的非线性调整系统研究法..... 932

1. 非线性元件的等效复放大系数(932) 2. 具有非线性元件的调整系统的方程式(939) 3. 非线性自动调整系统自持振荡的稳定性(941) 4. 非线性调整系统稳定性的研究举例(943) 5. 具有非零阶非线性元件的调整系统的分析(956) 6. 非线性调整系统的镇定(962) 7. 正弦波扰动下的非线性系统(964) 8. 某些非线性元件的等效复放大系数的计算(966)

第三十四章 近似研究周期性情况的各种方法的比较及其应用

范围..... 972

1. 稳态振荡是正弦波的条件(972) 2. 两类近似方法(976) 3. 应用第一类和第二类方法决定周期性情况的概述(977) 4. 第一类和第二类方法应用于决定周期性情况时的比较(979) 5. 周期性工作情况的稳定性(985) 6. 论双周期工作情况(993) 结语(993)

第 七 篇

继电器型自动调整系统的分析法

第三十五章 继电器型自动调整系统理论的某些问题..... 998

1. 自持振荡参量的求法(998) 2. 求自持振荡过程参量的例子(1010) 3. 校正电路对自持振荡过程的影响(1013) 4. 利用外加高频振荡来抑止自持振荡(1014) 5. 振荡同步的例子(1019) 6. 振荡线性化和继电器

型鎮定系統对緩慢变化的外作用的反应(1022) 7.具有校正裝置的繼电型自持振蕩系統和对緩慢变化外作用的反应(1027)

第三十六章 一类繼电型自动調整系統的自持振蕩的解析研究法.....1033

1.問題的提出(1033) 2.周期解的构成(1036) 3.周期解穩定性的研究(1037)

第三十七章 分析繼电型自动調整系統中自持振蕩和强制振蕩用的頻率法.....1043

1.前言(1043) 2.自持振蕩与强制振蕩存在与穩定的条件(1045)
3.系統綫性部分对一序列矩形脉冲的反应的計算(1048) 4.繼电型自动調整系統的特性和自持振蕩强制振蕩的求法(1049) 5.繼电型系統中自持振蕩与强制振蕩的穩定性(1052) 6.自持振蕩或者强制振蕩形狀的計算(1062) 7.繼电型随动系統中自持振蕩与强制振蕩的研究(1064)

第 八 篇

具有非綫性参量与变参量的自动調整系統中过渡历程的一些图解分析繪制法

第三十八章 繪制自动調整系統过渡历程用的图解分析法和割綫法.....1071

1.割綫法的一般特点(1072) 2.指数曲綫的某些性質和画法(1073)
3.常系数一阶非齐次方程的解(1077) 4.积分环节方程式的解(1080)
5.振蕩环节方程式的解(1081) 6.一阶环节中过渡历程的繪制(1084)
7.方程式(4)一(11)所描述的二阶环节中过渡历程的繪制(1086)
8.論典型非綫性环节方程式的解(1089) 9.含有任意个数环节的調整系統中过渡历程的繪制(1091) 10.本方法应用举例(1092)

第三十九章 自动調整系統中过渡历程的图解分析繪制法和切綫法.....1097

1.一阶方程式的解(1098) 2.常系数与变系数微分方程所描述的自动調整系統中过渡历程的繪制法(切綫法)(1099) 3.附加半步距法(1105)
4.当自动調整系統用非綫性微分方程描述时过渡历程的繪制方法(1106)
5.当自动調整系統用微分方程組描述时过渡历程的繪制方法(1109)
6.切綫法应用举例(1112)

第二部分

非綫性自动調整系統理論的某些問題

本書第一部分主要講述的是，怎样按綫性近似解决自动調整理論中的基本問題。按綫性方法研究調整系統所得到的結果，常常具有重大的实际价值，虽然它明明是近似的。但是有时候綫性分析法是不适用的，因此有必要重視非綫性方法。

利用非綫性方法研究調整系統，可以发现一些在綫性系統中不可能看到的极为新奇的現象。比方說，如果綫性系統是穩定的，那末不論它对所研究的状态發生的初始偏移是什么值，它都是穩定的。可是非綫性系統可能在小偏移时是穩定的，而在大偏移时却不穩定。

对于不在穩定邊緣上的綫性系統來說，不論初始偏移是什么值，它的自由振蕩只可能有两种运动形态，一种是系統所有座标的偏移都趋于零，另一种是都趋于无穷大；而在非綫性系統中，却可能有大量各式各样的运动。

这里首先必須指出通常在整定和維護調整系統时所碰到的自持振蕩現象，这种現象乃是一种周期性运动，它并不是由于外界加于系統上的周期性作用所引起的，而是由于系統本身的动特性所引起的。

調整系統中的自持振蕩問題具有重大的实际意义。通常它在正常工作条件下是不容許的，但是有时候恰好相反，人們特地用它来改善系統的动特性。因此，必須善于决定自持振蕩的产生条件、穩定性、压抑它的措施以及它的参量等等。

例如有时在繼电型或者使用非綫性校正元件的系統中，由于系統本身的作用原理，是不能应用綫性方法的。最后还可以指出，利用綫性方法所得出的品質指标值和动态准确度值会和实际值相差悬殊，为

了提高結果的准确度，必須重視非綫性方法。但是如果說綫性微分方程理論（本書第一部分所講过的綫性調整系統分析法就是以它为基础的）已經研究得相当透彻，那末遺憾的是非綫性微分方程目前还没有一般理論。

在牛頓和萊布尼茲时代，微分方程理論的主要問題是，尽可能为更广泛类型的微分方程寻求以初級函数表示、或者以含有初級函数平方的表达式表示的通解。但是很快就发现，主要只是綫性微分方程，才能沿这个方向得到显著的成果^①。

非綫性微分方程理論在应用与計算方面进一步重大发展的方向是：研究解方程的近似方法和数值方法，分析解的稳定性（李亚普諾夫的研究成果），研究微分方程定性理論（这种理論的奠基者是龐卡來）。

我們可以用一阶方程組：

$$\frac{dx_i}{dt} = X_i(x_1, x_2, \dots, x_n, t); \quad (i=1, 2, \dots, n).$$

来作为分析非綫性調整系統的基础，这样并不会严重妨碍普遍性（参看第一部分中的第四章）。

所謂全面分析上述方程式所描述的自动調整系統，就是應該決定該系統在实际条件下可能发生的各种运动，以及詳尽地研究該系統中最典型的运动形态（決定它的数值特性，品質指标，动态准确度，自持振蕩的幅与頻，決定穩定域以及系統参量变化对运动特性的影响等）。但是目前在 $n > 2$ 时，进行上述分析是非常困难的。最复杂的是研究所謂非定态过程（这时方程式右边有 t ），这对于自动調整系統（特别是随动系統）理論來說是最引人注意的。的确，正象第一部分所講过的，調整理論中的品質問題和动态准确度問題，是和分析各种時間函数所引起的非定态过程密切相关的。

事实上，分析复杂程度不同的非綫性調整系統中的非定态过程，

① 参閱 В.В.Немыцкий, В.В.Степанов, Качественная теория дифференциальных уравнений, ГИТТЛ, 1947.

只能利用各种数值或图解积分法。这些方法的严重缺点是：从原則上来說，每次只能得到一个具体的解，为了寻求另一个具体的解，就必须从头进行全部計算。很明显，这种方法本身不是建立一般調整理論的基础，只能作为輔助的分析工具。因此不論是考虑加于系統上的外作用还是考虑非綫性时，全面研究調整系統乃是一个沒有解决的問題，在目前水平上，必須解决下列問題：應該偏重于怎样把系統实际工作条件加以理想化：考虑外作用，利用綫性近似，或研究主要的非綫性，而忽略外作用。

本書不仅不可能全面講述目前已經知道的解非綫性問題的所有方法，甚至也不可能全面講述与調整理論有直接关系的所有問題。不能希望本書比在目前已成为經典著作的 A.A. 安德洛諾夫与 C.Э. 海金合著的“振蕩理論”或 H.M. 克雷洛夫与 H.H. 波戈留波夫合著的“非綫性力学概論”中所講述的更确切和更全面。

本書的任务是指出，非綫性振蕩理論的某些一般方法怎样用来分析調整系統，以及由于調整理論中非綫性問題的特点，这些方法得到怎样的变化和发展。

第五篇

相空間的概念及其在解决某些 非綫性調整理論問題方面的应用

前面已經講过，微分方程定性理論的概念和方法是由 A.A. 安德洛諾夫应用在調整理論之中的。A.A. 安德洛諾夫解决非綫性問題的方法的特点是①：

(1) 研究的是在各种初始条件下动力学系統可能产生的所有各种运动；

(2) 把这种研究工作用几何方法来进行，利用相空間，把系統的运动用相空間中的曲綫来表示；

(3) 研究当系統參量变化时，相空間中发生什么变化。

在調整理論中应用 A.A. 安德洛諾夫方法所得到的最重大和最引人注意的結果，乃是安德洛諾夫自己和 A.T. 迈尔一同解决的古典的維什涅格拉斯基問題，也就是使用直接作用式离心調整器的蒸汽机当調整器中既有干摩擦、又有黏性摩擦时的行为問題。为了解决這個問題，必須使用三維相空間和曲面的逐点变换法。

安德洛諾夫所提出的机理和方法，在他的学生和后繼者的著作中有了进一步的发展。

这一篇的目的就是介紹相空間概念和逐点变换法的一些基本知識，并且說明它們怎样用来解决某些非綫性調整理論問題。

目前这一方法可以用在二阶非綫性(有时三阶)微分方程所描述的許多調整系統上来。

(1) 研究各种初始条件下系統所有可能的运动；

(2) 研究系統在有限的初始偏移下平衡状态的稳定性，也就是大

① 請參閱 T.C. 高列力克在全苏第二次自动調整理論會議上的報告。

范围的稳定性；

(3) 求出系统中可能发生的自持振荡状态，分析它的稳定性，并且决定自持振荡产生与消灭时参量间的关系；

(4) 确定系统自由振荡的性质(有时还要量方面的指标)和系统参量之间的关系。

本篇各章的内容可以简单介绍如下：

第二十六章是本篇的第一章，其中试图对自动调整系统的某些典型非线性静特性加以分类。

第二十七章介绍了相平面的概念，并对奇点和奇迹加以分类，还举了一些为某些调整系统绘制相图的例子。此外，这一章还介绍了多叶相曲面的概念。

第二十八章讲的是考虑于摩擦和齿隙时自动调整系统相曲面的分析。

第二十九章简单地介绍了逐点变换法的机理，并且还说明了它怎样应用于含有非单值非线性静特性元件的调整系统。

第三十章研究的是利用各种线性反馈来镇定继电型(或近乎继电型)伺服机构和控制它的自持振荡的问题。

本篇的最后一章——第三十一章显得特殊一些。这一章研究的是考虑到被调整量导数的定限时怎样决定过渡时间最短的单调过渡历程形状的问题。这里还讲述了在某些条件下利用非线性反馈实现近乎上述过程的方法。

第二十六章

自动調整系統的典型非綫性特性

根据研究各种調整系統的經驗，我們知道，非綫性对于系統动态特性的影响常常是局部的，如果引起系統新的运动类型，也不会改变由綫性化系統所决定的运动基本特点。

但是在实际上常会碰到一些自动調整系統、随动系統、放大变换装置或者調整器的伺服机构，他們具有所謂“根本非綫性”特性，这类特性对系統动态行为有着决定性的影响。

具有这类根本非綫性特性的系統，通常是不能加以綫性化和当作綫性系統研究的。研究这类系統的稳定性时，應該保持它們的非綫性特点。

这一章的任务并不是研究各种調整对象、調整器及其元件的各式各样的非綫性特性。我們这里只是尽可能設法从各种根本非綫性特性中，选出一些对自动調整系統說来比較典型的特性，并且說明，这些典型的非綫性怎样用数学表示和怎样用实验测出来。

1. 自动調整系統的非綫性特性

各种調整对象、調整器元件、伺服机构等的运动，通常可以用形如下式的方程式来描述：

$$A \frac{dx_i}{dt} = X_i - Y_i (i=1, 2, \dots, n). \quad (1)$$

例如，原动机($i=1$)的 $x=\omega$ 乃是机軸旋轉角速度， $X=M_{\omega}$ 乃是运动力矩，而 $Y=M_c$ 是阻力矩。系数 $A=J$ 乃是旋轉体的慣性矩。

对于气体容器來說， $x=\gamma$ 是气体密度， $X=D_n$ 是单位時間內的进气量， $Y=D_m$ 是单位時間內的排气量，而系数 $A=V$ 乃是气体容器的容量。

方程式(1)的右边可以是時間、系統广义座标及其对時間的導数的函数。左边的系数也可能是時間的函数,或者随座标而变化。

根据这一章的任务,我們認為方程式(1)左边的系数是常数,只是方程式(1)右边才和广义座标及其導数有关。

这类关系就是机器、工作过程、自动調整装置等在不同工作条件和工作状态下的特性。每一个具体的調整对象、調整器及其伺服机构等,都有自己的特点,而上述特性正是反映这些特点的。

我們所关心的是在各种定态下这些关系的表达式,通常把这些表示方程式右边与广义座标在各种定态下的关系的特性,叫作靜特性(見第四章)。

大多数自动調整系統的特性,都是形状复杂的非綫性特性。例如我們所研究的原动机,它的原始方程式乃是描述旋轉部分的上述方程式(1),它的运动力矩(差不多)依調整机构的座标 m 与角速度 ω 为轉移,而阻力矩依角速度 ω 为轉移,如图1所示(脚注0表示原动机的一个稳态)。

倘若我們研究的是在容积 V 內充气的过程,它的原始动力学方程式乃是表示質量守恒定律的方程式,那末当送气压力 P_a 恒定时,单位時間內的进气量差不多和調整机构的进气截面以及容器中的气压 P 成正比,其特性如图2所示。

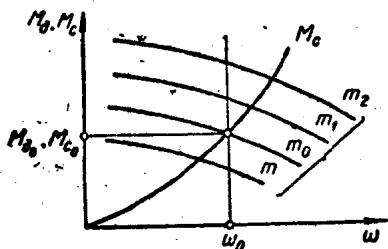


图1 原动机的特性 M_c
(ω)与 $M_0(m, \omega)$

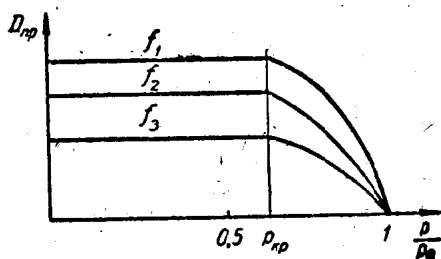


图2 进反量气与压力 P 和調整机构截面 f 的关系特性曲线

最后，如果研究的是用继电器控制的伺服电动机运动过程，那末它的原始运动方程式又是旋轉部分的方程式(1)。

它的运动力矩依控制元件的輸入座标——继电器的电流 i 为轉移，而阻力矩依角速度与負載为轉移。在不同的恆定負載下，它的特性如图 3 与图 4 所示。

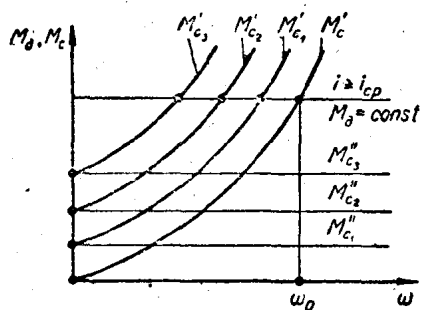


图 3 利用继电器控制的直流电力
驱动特性 (M_c —恆定負載)

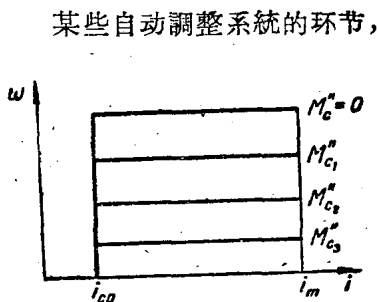


图 4 利用继电器控制的直
流电力驱动特性

它的特性的显著特点是可以綫性化，也就是在范围很小的某些段落上，可以用与特性相差无几的直綫来替代。然而并不是对自动調整系統所有各种工作状态都可进行特性的綫性化，通常只是对人們最关心的一种工作状态进行綫性化。

在这种情况下，靠近一定的平衡位置的非綫性特性，可用直綫(例如斜率不等于零或无穷大的切綫)替代，这样研究稳定性，叫作研究小范围内的稳定性，这也就是说，得出的結果，只适用于系統靠近給定平衡位置的微偏情况。

綫性化的范围依非綫性特性的形状为轉移，如果非綫性程度很小，那末綫性化范围可以包括系統大多数的工作情况。

通常我們把可以在相当寬广的范围内綫性化的特性；以及綫性化范围对于研究自动調整系統稳定性与过渡历程品質說来无足輕重的特性，叫作并非根本非綫性特性。

除了并非根本非綫性特性而外，还有一些特性，要想保存住它們的特性，是决不能綫性化的。

属于这类特性的，是那些不能在輸入量所需变化范围内綫性化的非綫性特性，或是那些用不能展成戴劳級数的函数表示的特性。

这类特性的另一个特点是：該函数对輸入座标的一次、二次等导数是不連續的。

我們可以举出电子管振荡器、非綫性电桥、恆速伺服机、具有干摩擦的装置、具有空隙的装置、具有繼电型特性的装置等，作为具有上述特性的装置的例子。

我們把这类特性叫作根本非綫性特性。

在自动調整系統中，碰到的是具有各种各样根本非綫性特性的装置，但是近来根据許多对非綫性的研究，例如根据〔1〕—〔12〕，可以在式样紛繁的非綫性特性中，归納出几类根本非綫性特性来，这几类特性乃是自动調整系統的典型非綫性特性。

这些特性①本身包含失灵区、綫性区(段)、非单值(或滯环)区(段)、饱和区(段)等。

2. 自动調整系統典型的非綫性靜特性

我們在研究具有典型非綫性特性的自动調整系統各种装置与元件的例子之前，首先列举出各种非綫性特性(見表1)。

列在表1中的，并不是所有可能的各种非綫性特性，而只是其中最具有代表性的和通常在实际調整系統中碰得到的特性。

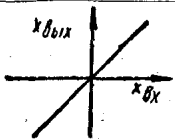
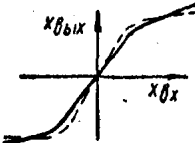
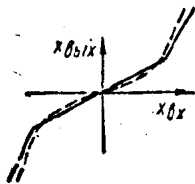
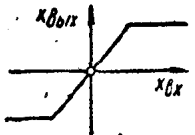
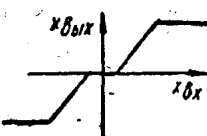
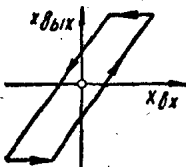
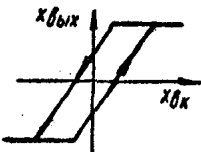
表1乃是自动調整系統典型非綫性靜特性分类的一个例子。为了能够清楚地区分主要的典型区和段，我們把非綫性特性近似地用逐段直綫函数来表示。

我們可以看到，橫軸表示該装置的輸入座标 x_{ax} ，縱軸表示它的輸出座标 x_{bix} ，它們可以表示偏移、速度、加速度等。至于它們的物理意义，后面将用具体例子來說明。

① 今后，我們把非綫性特性分成区和段，所謂“区”，就是包含座标原点在內的非綫性特性段。

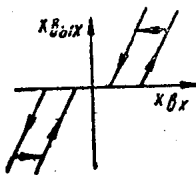
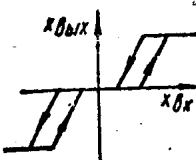
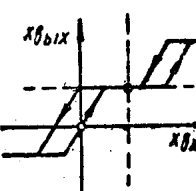
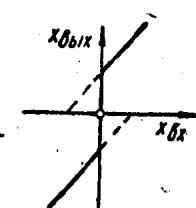
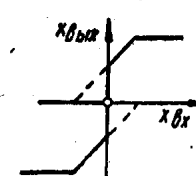
自动调整系统的典型非线性特性(分类举例)

表 1

特性名称	特性形状	特性简述	非线性特性的主要区(段)
线性特性		在输入座标($X_{\theta x}$)的整个变化范围内都是线性特性	线性区
单值非线性特性		平方特性①(可用逐段线性函数来近似替代)	线性区与线性段
单值非线性特性		平方特性①(可用逐段线性函数来近似替代)	线性区与线性段
		输出座标(位移、速度、加速度)变化有定限的元件的特性	线性区, 饱和段
		同上, 但控制元件中搭接段, 执行元件中有摩擦等	失灵区; 线性段, 饱和段
非单值非线性特性		有空隙、摩擦时元件的特性	非单值区
非单值非线性特性		同上, 但输出座标变化有定限	非单值区; 饱和段

① 这一特性与下面的一种特性是有区别的, 因此前者称为“平方根特性”而后者称为“平方特性”才更恰当一些。——译者

續表

特性名称	特性形状	特性简述	非线性特性的主要区(段)
非单值非线性		同上, 但控制元件中有搭接段, 有预拉力等	失灵区; 非单值段
非单值非线性		同上, 但控制元件中有搭接段, 有预拉力等	失灵区; 非单值段; 饱和段
非线性、非单值、非对称特性		同上, 但特性不对称	失灵区; 非单值段; 饱和段
单值非线性		具有有搭接段的元件(气流管等)的特性	无失灵区; 线性段
单值非线性		同上, 但输出座标变化有限	无失灵区; 线性段; 饱和段